Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“___“ _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

“ Ефективність використання освітлювальних установок з автономним живленням”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-22М3
ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____Павло Черняк
«____»_____2023 р.
Керівник роботи
к.т.н., доцент
_____Іван САВЕЛЕНКО
«_____»_____2023 р.
Рецензент _____
_____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет *будівництва, транспорту та енергетики*
Кафедра *електротехнічних систем та енергетичного менеджменту*
Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*
Галузь знань *14 Електрична інженерія*
Спеціальність *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*
Освітньо-професійна програма *Електротехнічні системи електроспоживання*

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри
_____ *Плєшков П.Г.*
«_____»_____2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Черняка Павла Олександровича
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) *Ефективність використання освітлювальних установок з автономним живленням*
Efficiency of using lighting installations with autonomous power supply

2. Керівник роботи (проекту) *Савеленко Іван Володимирович, к.т.н., доцент*
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту *30.12.2023 р.*

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)
Метою дослідження є удосконалення системи керування автономним живленням освітлювальних установок, дослідження енергетичних характеристик сонячних панелей та акумулюючих в системах зовнішнього освітлення. Завдання дослідження: дослідити властивості сонячних панелей і акумулюючих елементів для автономного живлення освітлювальної установки; розробити методику та виготовити експериментальної установки для вимірювання потоку сонячного випромінювання в режимі реального часу;визначити вплив кліматичних умов території на енергетичні

характеристики сонячного випромінювання; розробити систему керування роботою автономного джерела живлення освітлювальної установки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	*к.т.н, доц. Савеленко І.В.*		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ.*	*10.10.23*	
2	*Аналіз сучасного стану освітлювальних установок зовнішнього освітлення з автономним живленням*	*16.10.23*	
3	*Джерело автономного живлення освітлювальних установок на базі сонячних елементів*	*28.10.23*	
4	*Визначення енергетичного потенціалу сонячного випромінювання*	*16.11.23*	
5	*Моделювання освітлювальної установки з автономним живленням та її техніко-економічне обгрунтування*	*30.11.23*	
6	*Охорона праці*	*06.12.23*	
7	*Висновки*	*12.12.23*	
8	*Оформлення пояснювальної записки та презентації магістерської роботи*	*25.12.22*	

Дата видачі завдання
«____» _____2023 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання
«____» _____2023 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Черняк П.О. **Ефективність використання освітлювальних установок з автономним живленням**

Efficiency of using lighting installations with autonomous power supply

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2023 р.

У кваліфікаційній роботі виконано дослідження енергетичних характеристик сонячних елементів та систем акумулювання, вдосконаленні системи керування автономним енергозабезпеченням освітлювальних установок та впливу кліматичних умов на енергетичний потенціал сонячного випромінювання.

Розроблено та впроваджено методику для вимірювання фотоелектричних характеристик сонячних панелей, а також побудовано експериментальну установку. Запропоновано модель сонячного елемента, параметри якої були експериментально визначені. Проведено моделювання впливу параметрів ідеальності діода та зворотного струму насичення діода на напругу холостого ходу сонячної батареї.

Виявлено лінійну залежність ємності суперконденсатора від рівня напруги зарядження. Установлено аналітичний зв'язок між середньодобовою поверхневою густиною енергії сонячного випромінювання та середньодобовим ступенем хмарності.

СОНЯЧНА ПАНЕЛЬ, ОСВІТЛЮВАЛЬНА УСТАНОВКА, СВІТЛОВИЙ ПРИЛАД, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ.

ABSTRACT

Cherniak P. Efficiency of using lighting installations with autonomous power supply.

“Ефективність використання освітлювальних установок з автономним живленням”

Specialty 141 - "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - EPP " Electrical systems of power consumption ". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2023

The qualification work includes a study of the energy characteristics of solar cells and storage systems, the improvement of the control system for autonomous power supply of lighting installations, and the impact of climatic conditions on the energy potential of solar radiation.

A methodology for measuring the photovoltaic characteristics of solar panels has been developed and implemented, and an experimental setup has been built. A model of a solar cell was proposed, the parameters of which were experimentally determined. The influence of the diode ideality parameters and the reverse diode saturation current on the no-load voltage of the solar cell was modeled.

The linear dependence of the supercapacitor capacitance on the charging voltage level is revealed. The analytical relationship between the average daily surface energy density of solar radiation and the average daily degree of cloudiness is established.

SOLAR PANEL, LIGHTING INSTALLATION, LIGHT FIXTURE, BATTERY PACK.

ЗМІСТ

ВСТУП 9

1. ВИВЧЕННЯ АКТУАЛЬНИХ СВІТОВИХ ТЕНДЕНЦІЙ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ 15

1.1. Актуальний стан енергозберігаючих технологій в освітлювальних системах 15

1.2. Аналіз стану зовнішнього освітлення в населених пунктах України . 18

1.3. Аналіз освітлювальних установок зовнішнього освітлення в системах автономного живлення 23

1.4. Фотоелектричні модулі джерел автономного живлення 27

1.5. Накопичувачі для автономних освітлювальних установок 31

Висновки до розділу 38

2. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ОСВІТЛЮВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ 39

2.1. Дослідження робочих характеристик сонячних панелей 39

2.2. Розробка моделі фотоелектричної панелі 44

2.3. Аналіз роботи блоку накопичення електроенергії 48

Висновки до розділу 52

3. ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ 53

3.1. Вимірювання потоку сонячного випромінювання 53

3.2. Аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання з врахуванням кліматичних умов території 55

Висновки до розділу: 64

4. МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОЇ ОСВІТЛЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ 65

4.1. Розрахунок сонячної енергетичної установки для зовнішнього

освітлення 65
4.2. Техніко-економічний розрахунок сонячної установки для зовнішнього освітлення 69
Висновки до розділу 72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... 73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 74
ДОДАТКИ..... 79
Додаток А..... 80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АКБ - акумуляторна батарея

АЦП - аналого-цифровий перетворювач

ВАХ - вольт-амперна характеристика

ККД - коефіцієнт корисної дії

ОУ - освітлювальна установка

СБ - сонячна батарея

СК – суперконденсатори

СП - світловий прилад

ФЕП - фотоелектричний перетворювач

ШІМ - широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Актуальність теми. Вуличне освітлення є необхідною складовою будь-якого населеного пункту. Витрати на зовнішнє освітлення становлять близько 30% від загальних витрат на електроенергію в населених пунктах, включаючи витрати на обслуговування, що є суттєвою частиною бюджету таких місць.

Проблема збереження енергетичних ресурсів на сучасному етапі стає надзвичайно актуальною. На сьогодні виявляється вигідніше зменшувати споживання електроенергії для освітлення за допомогою сучасних технологій, ніж будувати нові генеруючі потужності для задоволення зростаючих потреб у світловій енергії. Витрати на створення 1 кВт нових генеруючих потужностей становлять до 3000 доларів США, тоді як для економії 1 кВт потужності в системах освітлення досить близько 300 доларів США [1-3]. Тому в багатьох країнах були запроваджені спеціальні програми економії електроенергії для освітлення [3].

Одним з загальних методів зниження споживання електроенергії (на 30-50% протягом 5-7 років) є широке впровадження сучасних засобів освітлення. Заміна ламп розжарювання (ЛР) на компактні люмінесцентні лампи (КЛЛ) розглядалась як основний шлях зниження енергоспоживання (перш за все, в житловому секторі) в більшості країн.

Прогрес в галузі фізики та техніки напівпровідникових джерел світла та їх застосування в світлотехніці протягом останнього десятиріччя відзначається великими досягненнями. XXI століття вже визначається як ера твердотільного освітлення.

На сьогодні науково-технічна база створена для конкурентної боротьби світлодіодів (СД) з традиційними джерелами світла, такими як лампи розжарювання (ЛР), розрядні лампи низького тиску (РЛНТ) та розрядні лампи високого тиску (РЛВТ), які є основою сучасної технології

електричного освітлення. Можна зазначити, що третій тип електричного джерела світла - СД - стає повноправним і вже конкурентноздатним ЛР та розрядним лампам (РЛ) в багатьох областях.

Зважаючи на передбачення щодо розвитку світлодіодної техніки, де очікується надходження на ринок СД зі світловою віддачею 100÷150 лм/Вт і значно меншою вартістю, можна передбачити перегляд стратегії програм розвитку енергоекономічної світлотехніки у найближчому майбутньому.

Україна також визначила розвиток енергоекономічних джерел світла, зокрема світлодіодної техніки, як свій пріоритет. У 2008 році Кабінет Міністрів України затвердив Державну цільову науково-технічну програму "Розробка та впровадження енергозберігаючих світлодіодних джерел світла та освітлювальних систем на їх основі" на період з 2009 по 2013 рік. Концепцію та перспективи розвитку світлодіодної техніки в Україні можна знайти в [3].

Про переваги світлодіодів та прогноз їхнього розвитку останнім часом опубліковано значну кількість матеріалів у світлотехнічних виданнях [1-10]. Світлодіоди вже виявилися вигідними у багатьох випадках, витісняючи лампи розжарювання та розрядні лампи в окремих сферах, і в найближчому майбутньому вони стануть невід'ємною частиною світлових пристроїв і галузей світлотехніки, таких як автомобільна світлотехніка, аварійні світильники, світлосигнальна та світлорекламна апаратура, прожектори, освітлення архітектурних об'єктів, дорожні покажчики, світлові доріжки, світильники для паркового та ландшафтного освітлення, підсвітка фонтанів, світлофори і багато іншого.

Майбутнє також обіцяє перспективи для світлодіодних світильників для вуличного освітлення, освітлення підземних переходів, світильників для сходових площадок будинків та інших областей. Інформація про певні спеціальні прилади із світлодіодами та прогноз їхнього розвитку подана в

[11-15].

Однією з ключових мет і завдань у сфері енергозбереження в системах зовнішнього освітлення та підвищення енергетичної ефективності є часткове заміщення традиційних ресурсів альтернативними джерелами енергії. Це сприятиме зниженню витрат і підвищенню стабільності та комфорту для мешканців населених пунктів. Серед таких джерел варто виділити сонячні енергетичні системи, які працюють, перетворюючи сонячну енергію безпосередньо на електричну.

Використання сонячних панелей у енергетиці має численні переваги над іншими альтернативними джерелами. Серед них висока надійність, економічність у витрати під час експлуатації, модульність конструкції батарей та ефективність будівництва електростанцій. Сучасні сонячні батареї наразі є найбільш перспективними серед альтернативних джерел енергії.

На сьогодні цей напрям альтернативної енергетики демонструє високий темп розвитку. З урахуванням того, що потік сонячної енергії змінюється відповідно до добового та річного руху Землі та під впливом кліматичних умов, необхідно мати системи, які не лише зберігатимуть енергію, але й раціонально розподілятимуть її. Для передбаченого накопичення електроенергії використовують різні типи акумуляторів. Одночасно з цим виробництво та застосування ємнісних накопичувачів електроенергії, таких як суперконденсатори (СК) чи іоністори, активно розвивається. Ці елементи можуть не лише накопичувати потрібну електроенергію, але й швидко передавати її навантаженню та витримувати велику кількість зарядно-розрядних циклів, не погіршуючи енергетичних характеристик. Ці нелінійні накопичувальні елементи представляють собою проміжний варіант між акумуляторами та лінійними конденсаторами, здатні витримувати понад мільйон зарядно-розрядних

циклів без втрати внутрішньої структури, що в 500 разів більше, ніж у літій-іонних акумуляторах.

На сьогодні залишається кілька невирішених завдань. Зокрема, це включає аналіз енергетичної ефективності світлотехнічних установок з автономним живленням, встановлення зв'язку між енергетичним потенціалом сонячного випромінювання та кліматичними умовами конкретної місцевості, а також раціональне зберігання сонячної енергії та її використання у темний період доби. Потреба у таких установках виникає там, де відсутні електричні мережі, а також у різних туристичних базах у гірських регіонах.

Отже, актуальним є дослідження освітлювальних систем з автономним живленням на основі сучасних сонячних систем генерації електроенергії та їх взаємодії з кліматичними умовами, а також ефективного зберігання та раціонального використання накопиченої електроенергії.

Метою даної роботи є удосконалення системи керування автономним живленням освітлювальних систем, а також дослідження енергетичних характеристик сонячних панелей та акумуляційних систем і їх впровадження в системи зовнішнього освітлення. Також вивчається вплив кліматичних умов на енергетичний потенціал сонячного випромінювання.

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити низку завдань:

1. Провести дослідження властивостей сонячних панелей та акумулюючих елементів, включаючи суперконденсатори, для автономного живлення освітлювальних установок.

2. Розробити методику та створити експериментальну установку для вимірювання потоку сонячного випромінювання в режимі реального часу.

3. Визначити вплив кліматичних умов на енергетичні характеристики

сонячного випромінювання.

4. Розробити систему керування роботою автономного джерела живлення освітлювальної установки.

5. Провести розрахунок енергетичної ефективності освітлювальної установки з автономним живленням на базі сонячних панелей та суперконденсаторів.

Об'єктом дослідження є процеси генерування електричної енергії сонячними фотоелектричними перетворювачами та її використання в освітлювальних установках.

Предметом дослідження є фотоелектричні перетворювачі та акумулюючі системи, включаючи суперконденсатори і літій-іонні акумулятори, для автономного живлення світлодіодних систем зовнішнього освітлення.

Методи дослідження включають в себе вимірювання фотоелектричних характеристик сонячних панелей, циклування, теорію електричних кіл і схемотехніку, а також використання сучасних програм для моделювання світлотехнічних характеристик освітлювальних установок.

Наукова новизна отриманих результатів включає:

1. Удосконалення математичної моделі системи "сонячна енергетична установка - освітлювальна система" в режимі максимальної потужності.

2. Уточнення взаємозв'язку між середньодобовою густиною потоку енергії сонячного випромінювання та середньодобовим ступенем хмарності території.

3. Отримання помісячних аналітичних залежностей середньодобової енергії сонячного випромінювання від ступеня хмарності.

4. Перший розрахунок енергетичного потенціалу сонячного випромінювання території центрального регіону України з врахуванням

кліматичних умов.

Практичне значення результатів включає:

1. Розробку методики та автоматизованої системи вимірювання та запису енергетичного потоку сонячного випромінювання.

2. Розробку та апробацію програми статистичної обробки часових характеристик густини потоку сонячного випромінювання протягом кожного місяця.

3. Розробку методики розрахунку сонячних енергетичних установок для зовнішнього освітлення населених пунктів та представлення результатів техніко-економічного розрахунку.

4. Представлення шляхів підвищення енергетичної ефективності освітлювальних установок з автономним живленням.

На даний момент, за даною темою, було опубліковано 1 тезу доповіді на конференціях.

РОЗДІЛ 1.

1. ВИВЧЕННЯ АКТУАЛЬНИХ СВІТОВИХ ТЕНДЕНЦІЙ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

1.1. Актуальний стан енергозберігаючих технологій в освітлювальних системах

Проблема енергозбереження в освітлювальних установках всіх країн світу, не тільки передових, але й тих, що розвиваються, має виняткове значення.

При цьому від успіхів у рішенні цієї проблеми багато в чому залежить майбутнє людської цивілізації не тільки у зв'язку з поступовим вичерпуванням паливних копалин, що йдуть на виробництво електроенергії, але й швидко відбувається забруднення навколишнього середовища викидами в атмосферу шкідливих речовин (діоксидів вуглецю й сірки, а також ртуті), утворених в результаті спалювання палива при виробництві електроенергії. У цей час на електричне освітлення доводиться приблизно 13% всієї виробленої електроенергії, значна частина освітлення доводиться на не ефективні лампи розжарювання.

Звичайна лампочка розжарювання тільки 10% одержаної енергії випромінює у вигляді корисного світла, і то не білого, а жовтого. Інші 90% витрачаються на нагрівання. Галогенна лампа випромінює у видимому діапазоні до 15% витраченої потужності, але це також не дуже знижує проблему енергозбереження у освітленні, тому необхідно скористатися іншими принципами випромінювання світла.

У різних країнах світу діють та реалізуються спеціальні програми енергозбереження, які включають в себе окремі розділи, присвячені вдосконаленню освітлювальних установок. Основною метою цих програм

є радикальне зменшення витрат електроенергії в освітлювальних системах (на 20-60%) і зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу. Міжнародне енергетичне агентство IEA (Міжнародне енергетичне агентство) та Організація економічного співробітництва і розвитку (OECP) спільно з Європейським міністерством навколишнього середовища представили програму, реалізація якої може призвести до зменшення споживання електроенергії для освітлення в середньому на 60%. Серед реальних заходів для підвищення енергоефективності освітлювальних систем та зменшення викидів CO2 від теплоелектростанцій найбільший акцент робиться на широкому впровадженні енергоефективних компактних люмінесцентних ламп замість ламп накалювання, автоматизованому контролі та управлінні освітленням в залежності від інтенсивності природного світла, а також більш ефективному використанні природного освітлення.

Зараз Європейською радою розроблені та частково вже діють 10-12 директив і програм, спрямованих на поліпшення ефективного використання електроенергії, охорону довкілля та переробку відходів виробництва. Зменшення енергоспоживання, досягнуте в рамках цих програм, є результатом різноманітного впливу як на структуру виробництва та застосування світлотехнічних виробів, так і на якість виробленої техніки та її ефективність. Важливо відзначити, що всі ці документи акцентують увагу на використанні компактних люмінесцентних ламп та нових світлодіодних джерел світла.

Існує чотири методи формування білих світлодіодів, кожен із них має свої переваги та недоліки. Один із підходів полягає у суміші випромінювання світлодіодів трьох чи більше кольорів (наприклад, червоного, зеленого та синього). У принципі цей метод повинен бути найбільш ефективним, оскільки для кожного світлодіода можна вибрати

значення струму, що максимізує його зовнішній квантовий вихід. Однак, для синтезу білого кольору потрібно змінювати кількість світлодіодів кожного кольору, що створює неефективність та потребує складних пристроїв для комбінації світла. Другий та треті підходи використовують комбінації блакитного світлодіоду та люмінофорів, таких як жовто-зелений або блакитно-зелений. Ці методи, хоча й прості, але економічно вигідні.

Склад кристала на основі In-Ga/Ga підбирається так, щоб його спектр відповідав спектрам збудження люмінофорів. Четвертий метод використовує комбінацію випромінювання трьох люмінофорів (червоного, зеленого та блакитного), які збуджуються ультрафіолетовим світлодіодом. Цей спосіб, хоча використовує технології та матеріали, розроблені для люмінесцентних ламп, має певні ефективність та енергетичні втрати. Виробництво білих світлодіодів для освітлення найбільш перспективне зараз відбувається за допомогою технології із одним або двома люмінофорами, нанесеними на блакитний кристал. Технологія із трьома люмінофорами також вивчається, але її успіхи наразі не настільки вражаючі. RGB-матриці застосовуються головним чином для створення світлодинамічних ефектів. Нанесення люмінофора в пластиковий купол, створюючи порожнину у формі півсфери гарантує рівномірний розподіл кольорів та світловий потік по всій площині світлової плями.

Світлодіоди є найбільш перспективними джерелами світла, вирізняючись багатьма перевагами порівняно з іншими джерелами:

1. Робота при низьких температурах: Їхня яскравість зворотньо пропорційна температурі навколишнього середовища, завдяки напівпровідниковій природі, що робить їх ефективними у наших кліматичних умовах. Діапазон температур експлуатації світлодіодів становить від -50 до +60 °C.

2. Висока світловіддача: Яскравість білих світлодіодів досягає 130 лм/Вт у серійному випуску і до 200 лм/Вт у лабораторних умовах, в той час як звичайна лампа розжарювання дає до 10 лм/Вт.

3. Чистота кольорів: Світлодіоди можуть випромінювати різні кольори і відтінки, такі як чисте синє, біле, жовтогаряче, синьо-зелене і інші, що неможливо отримати за допомогою ламп розжарювання.

4. Високий рівень безпеки: Забезпечується низьким тепловиділенням та низькою живлячою напругою, що дозволяє їх використовувати під водою або в умовах з високими вимогами до безпеки.

5. Спрямованість випромінювання: Має різноманітні модифікації щодо спрямованості світла, не потребуючи спеціальних відбивачів або розсіювачів.

6. Відсутність ртуті та інших отруйних речовин.

Якщо прогнози щодо досліджень та розробок світлодіодів виправдаються, витрати на електроенергію для освітлення зменшаться приблизно у два рази.

1.2. Аналіз стану зовнішнього освітлення в населених пунктах України

Питання ефективного використання природних ресурсів, вдосконалення систем споживання електричної енергії та впровадження екологічних технологій в побуті і на виробництві залишається на порядку денному. Однією з ключових мет цей області є часткове заміщення традиційних ресурсів відновлювальними джерелами енергії, на що звертається значна увага в останні роки [2-5]. Використання альтернативних джерел енергії в системах зовнішнього освітлення може

призвести до зниження витрат і підвищення стабільності їх роботи, забезпечуючи комфорт мешканців населених пунктів.

Для оцінки характеристик систем зовнішнього освітлення в населених пунктах України були використані такі параметри, як протяжність мереж зовнішнього освітлення, загальна кількість спожитої електроенергії, кількість світлоточок з різними джерелами світла, та кількість електроенергії, яку споживає кожна світлоточка (таблиці 1.1-1.2) [6]. На жаль, на сьогоднішній день статистичні звіти організацій міськсвітла населених пунктів України не включають дані про автономні системи живлення зовнішнього освітлення, тому ці дані відсутні в таблиці 1.1-1.2.

Станом на 1 січня 2022 року загальна протяжність електромереж зовнішнього освітлення складала 129,8 тис. км, що є збільшенням на 12 тис. км порівняно з 2021 роком. У 2022 році спожито 608,7 млн. кВтгод електроенергії для зовнішнього освітлення, що становить зростання на 52,4 млн. кВтгод порівняно з 2021 роком. Витрати на електроенергію для зовнішнього освітлення зросли на 547,44 млн. грн. за рік, досягнувши 1008,16 млн. грн. Середня вартість річного енергоспоживання однієї світлоточки становить 488,8 грн., що перевищує показник за 2021 рік на 101,6 грн.

На початок 2022 року кількість світлоточок у зовнішньому освітленні склала 6,39 мільйона, що перевищує показник 2020 року на 3,5 мільйона. Система освітлення включає 280, 6 тисячі ламп розжарювання, 1264,6 тисячі люмінесцентних ламп, 872, 9 тисячі ртутних, 1583,06 тисячі натрієвих, 51,15 тисячі металогалогенових і 608,2 тисячі енергозберігаючих світлодіодних джерел світла, що виявляється на 514,8 тисяч більше, ніж у відповідному показнику 2020 року.

Таблиця 1.1. Характеристики зовнішнього освітлення за 2020-2021 рік

Адміністративно - територіальний поділ	Спожита електроенергія, *тис. кВт год*		Спожита світлоточками, *кВт*год*		Витрати на електроенергію, зовнішнього освітлення, *тис. грн.*	
	За 2020 рік	За 2021 рік	За 2020 рік	За 2021 рік	За 2020 рік	За 2021 рік
Вінницька	17183,0	18848,9	216,7	221,1	19601,4	36911,4
Волинська	8380,0	8808,9	182,4	218,5	10634,8	20849,6
Дніпропетровська	41713,6	78159,9	183,7	323,2	57809,8	122031,9
Донецька	30681,9	37366,0	350,8	384,6	41128,6	73164,1
Житомирська	7866,1	8748,3	176,5	150,3	4719,7	20383,0
Закарпатська	14647,9	18021,0	255,4	238,8	14137,0	32858,0
Запорізька	23488,0	26968,0	188,1	235,4	12132,5	41751,4
Івано-Франківська	10913,9	10816,8	260,4	205,0	13631,5	20660,1
Київська	44333,3	56841,3	387,3	428,6	12658,7	65486,5
Кіровоградська	11180,4	10860,6	201,0	178,3	9715,9	20561,0
Луганська	4491,1	4502,1	256,1	216,7	5408,8	10622,4
Львівська	44920,7	53236,9	423,5	490,9	43739,3	75690,1
Миколаївська	20007,9	19312,0	261,5	227,0	23779,8	40086,1
Одеська	50240,1	51919,9	7257,8	6962,7	51608,6	79666,7
Полтавська	13860,0	13420,0	132,0	107,8	13640,0	11143,0
Рівненська	15977,6	15627,8	367,2	322,4	11634,8	22861,1
Сумська	18836,3	19696,5	261,9	245,0	21333,0	37603,8
Тернопільська	7435,3	7643,0	225,3	235,1	8671,9	17558,0
Харківська	52857,2	53231,3	373,9	254,9	57821,3	101025,0
Херсонська	9394,0	10862,8	346,5	346,5	6827,7	15462,2
Хмельницька	18060,1	19251,5	244,0	8,9	20510,2	20510,2
Черкаська	19451,7	19937,9	231,6	217,3	23014,5	37825,2
Чернівецька	8787,0	7825,5	275,6	149,8	10425,0	12697,5
Чернігівська	7021,7	10370,4	131,9	96,5	6670,6	22846,8
Всього по Україні:	568880,4	647661,2	13563,8	12827,1	586638,4	1089262

Таблиця 1.2 Кількість світлоточок відносно типів джерел світла за 2022 рік

Області	Кількість світлоточок за типами джерел світла, тис. шт.					
	ЛР	ЛЛ	РТ	НТ	МТГ	СДЛ
Вінницька	5,65	18,50	7,58	36,34	0,68	24,98
Волинська	3,48	10,96	6,41	18,59	0,07	10,81
Дніпропетровська	25,69	127,26	12,47	42,02	0,51	58,05
Донецька	7,86	11,11	11,08	58,67	0,56	17,59
Житомирська	4,94	9,36	5,66	15,96	0,35	26,72
Закарпатська	19,00	21,75	15,41	17,63	0,67	8,55
Запорізька	8,22	31,32	8,67	45,29	0,41	32,10
Івано-Франківська	3,45	13,45	6,33	20,01	0,71	14,09
Київська	15,40	25,19	41,32	34,32	4,64	25,01
Кіровоградська	14,96	13,21	2,87	17,93	0,16	17,88
Луганська	0,74	6,67	0,70	7,78	0,10	6,87
Львівська	17,28	12,56	11,97	51,73	4,44	21,30
Миколаївська	7,45	1,65	11,32	30,39	5,39	37,38
Одеська	44,85	22,09	6,68	75,79	5,00	28,39
Полтавська	12,10	18,70	18,70	77,00	3,30	6,60
Рівненська	3,04	15,96	8,09	14,71	0,25	11,27
Сумська	21,97	13,40	16,23	20,91	0,12	15,81
Тернопільська	10,62	17,37	4,03	12,81	0,02	10,46
Харківська	4,28	32,28	6,86	40,23	23,26	76,56
Херсонська	4,02	6,22	4,62	12,49	0,11	7,04
Хмельницька	84,62	1122,39	922,64	1124,88	2,48	233,79
Черкаська	6,07	40,57	18,05	19,45	1,99	14,83
Чернівецька	2,53	6,30	3,55	22,77	0,48	9,59
Чернігівська	5,26	10,56	8,47	18,59	0,34	17,82
Всього по Україні:	333,90	1610,58	1179,97	1964,67	58,46	779,04

У даній роботі особлива увага приділена системам зовнішнього

освітлення міста Кропивницький та прилеглих населених пунктів Кіровоградської області. Характеристика світлотехнічних систем зовнішнього освітлення міста Кропивницький за період 2020-2022 роки, відповідно до інформації від КП «Міськсвітло», представлена в таблиці 1.3.

Протягом 2022 року в місті Кропивницькому було використано приблизно 3,4 млн. кВт*год електроенергії для зовнішнього освітлення. Цей показник зрос на 0,21 млн. кВт*год (7 %) у порівнянні з 2021 роком та на 0,26 млн. кВт*год (8,6 %) у порівнянні з 2020 роком. Витрати на електроенергію, яку використовують для зовнішнього освітлення, збільшилися протягом 2020 року на 2,1 млн. грн. (54 %) і склали 4,15 млн. грн. Графіки цих змін представлені на рис. 1.1. Вже сьогодні існує можливість значного зменшення витрат електроенергії для вуличного освітлення, використовуючи альтернативні джерела енергії, зокрема сонячну енергетику.

Таблиця 1.4 Споживання енергії в. Кропивницькому за 2020 - 2022 рік

Місяць	2022 рік		2021 рік		2020 рік	
	*Wос кВт*год*	Сума з ПДВ, *грн.*	*Wос кВт*год*	Сума з ПДВ, *грн.*	*Wос кВт*год*	Сума з ПДВ, *грн.*
Січень	15620,9	17135,4	197,0	201,0	17819,4	33555,8
Лютий	7618,2	8008,1	165,8	198,6	9668,0	18954,2
Березень	37921,4	71054,4	167,0	293,8	52554,4	110938,1
Квітень	27892,6	33969,1	318,9	349,6	37389,6	66512,8
Травень	7151,0	7953,0	160,5	136,7	4290,6	18530,0
Червень	13316,2	16382,8	232,2	217,1	12851,8	29870,9
Липень	21352,7	24516,4	171,0	214,0	11029,5	37955,8
Серпень	9921,7	9833,5	236,7	186,4	12392,3	18781,9
Вересень	40303,0	51673,9	352,1	389,6	11507,9	59533,2

Продовження таблиці 1.4

Жовтень	10164,0	9873,3	182,7	162,1	8832,6	18691,8
Листопад	4082,8	4092,8	232,8	197,0	4917,1	9656,7
Г рудень	40837,0	48397,2	385,0	446,3	39763,0	68809,2
Всього	18189,0	17556,3	237,7	206,4	21618,0	36441,9

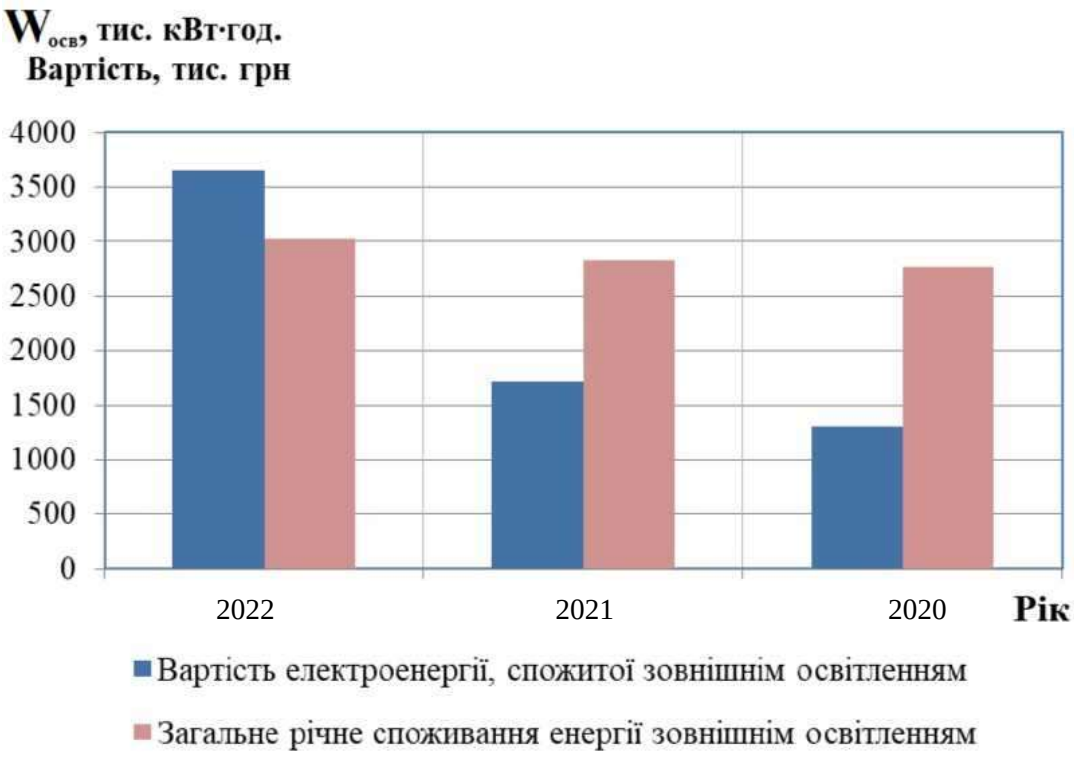


Рис. 1.1. Сумарна річна енергія спожита зовнішнім освітленням $W_{осв}$. в м. Кропивницькому.

1.3. Аналіз освітлювальних установок зовнішнього освітлення в системах автономного живлення

В наш час велике значення має використання самостійних світлодіодних освітлювальних установок з автономними джерелами електроенергії. В Україні існують багато місць, де необхідне зовнішнє та

садово-паркове освітлення, освітлення доріг, проте важко або неможливо підключитися до центральних джерел електроенергії. Для вирішення цього питання застосовуються автономні світильники, які використовують альтернативні джерела енергії.

На поточному етапі розвитку зовнішнього освітлення існують багато компаній, які виробляють автономні світильники на сонячних панелях.

Компанія "Sun Shines" спеціалізується на виробництві автономних систем освітлення, які можна встановлювати на наявні опори з діаметром 76 або 89 мм [8].

Комплект системи призначений для заміни традиційних вуличних світильників, які живляться від мережі, а також для освітлення територій, де складне або неможливе підведення електроенергії.

Автономна система освітлення ідеально підходить для підсвічування доріг за межами населених пунктів, зупинок громадського транспорту поза населеними пунктами, віддалених об'єктів без електричної мережі, а також для освітлення вулиць, дворових зон, автомобільних парковок, і пішохідних переходів [7]. Також можливе використання світильників з вбудованими датчиками руху з радіусом дії 12-15 метрів. Зовнішній вигляд вуличного світильника від компанії "Sun Shines" представлений на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Зовнішній вид автономного світильника марки «Sun Shines»

Компанія EPS-soltec [9] виготовляє освітлювальні установки, які використовують сонячну енергії для тих випадків, коли неможливо підключитися до мережі. Завдяки використанню восьми сонячних модулів, що розміщуються один над одним, навіть при розсіяному світлі можна домогтися високої ефективності сонячної ОУ. EPS-soltec представлений на рис. 1.4.



Рис. 1.3. Зовнішній вигляд вуличного світлодіодного світильника з накопичувачами EPS-soltec

Лампи можуть бути встановлені в будь-якому місці, де немає доступу до електромережі і де потрібна надійна робота навіть в умовах недостатнього освітлення. Благодаря кубічній алюмінієвій конструкції з двома чотирифотоелектричними модулями можна отримати достатньо енергії від розсіяного світла, особливо в районах з непогодженими погодними умовами. Перпендикулярне розташування модулів заважає накопиченню снігу взимку. Унікальні функції енергозбереження гарантують стабільну роботу протягом кількох ночей навіть у невелику погоду [9]. Згідно з європейським стандартом DIN EN13201, з урахуванням

рівнів освітленості, установка світлотехніки SUN рекомендується для використання на житлових вулицях, другорядних дорогах і парковках. Вбудований акумулятор заряджається протягом дня завдяки восьми фотоелектричним модулям, а вночі використовує накопичену енергію для живлення світлодіодної лампи.

На рисунку 1.4 наведено графіки розподілу світла системи освітлення Sun-128.

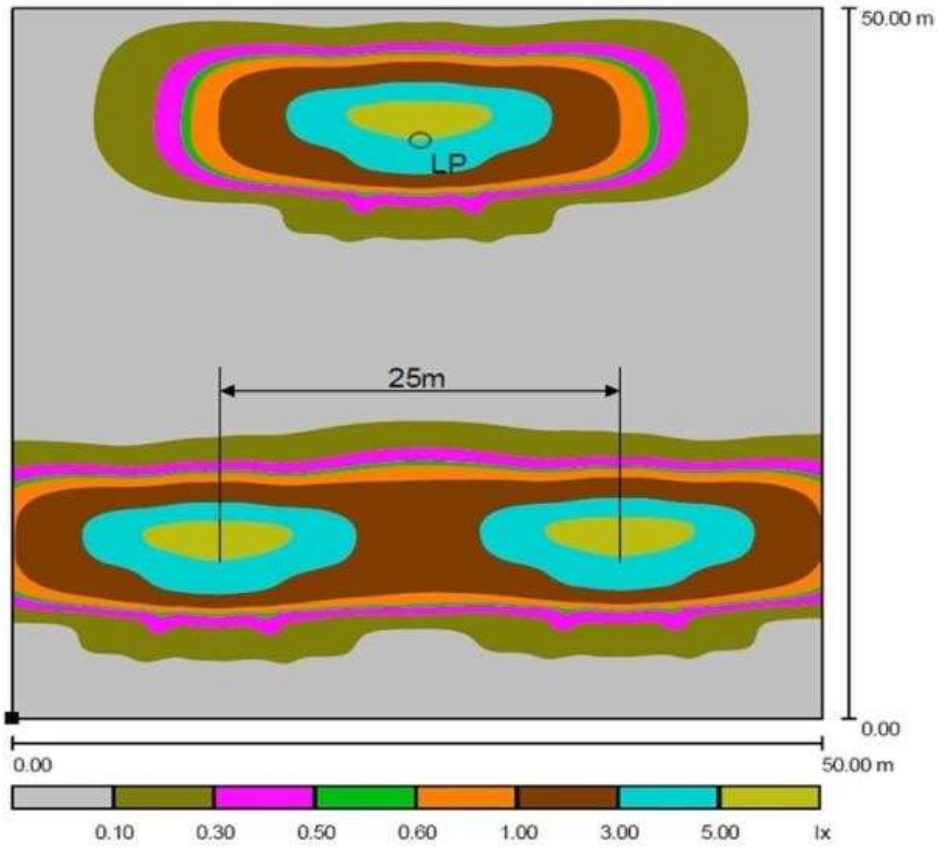


Рис. 1.4. Розподіл інтенсивності світла в програмі DIALux

Окрім великих варіантів SUN 128, також доступні моделі, які розширюють можливості світлодіодних освітлювальних установок сімейства SUN. Зокрема, SUN 64, яка має зменшену світловіддачу, молодша версія SUN-LIGHT з додатковою можливістю напряму світла для

пішохідних зон і площ, а також STATIONSUN, спеціально розроблена для освітлення зупинок громадського транспорту.

1.4. Фотоелектричні модулі джерел автономного живлення

Для забезпечення енергією зовнішнього освітлення населених пунктів, [10] рекомендує використовувати фотоелектричні модулі типу KB50, акумулюючі батареї Santec 200 та світлодіодні світильники з потужністю 80 Вт. У [11] проведений аналіз комбінованої системи живлення освітлювальних установок (ОУ), яка охоплює автономне живлення і живлення з електричної мережі. [12] підтверджує технічну реалізацію автономної системи вуличного освітлення за допомогою сонячних панелей YL300C, акумуляторних батарей типу LYP200 ємністю 200 А·год, інверторів TS-3000 на 48 В та контролерів заряду ECO MPPT Pro 200. У [13] наводиться варіант використання автономних енергозберігаючих систем освітлення в парковій зоні зі світлодіодним світловим приладом LED-22 на 24 В потужністю до 50 Вт, обладнаного направленим світловим потоком та оптичною системою для більш ефективного використання.

Використання світлодіодного освітлення сприяє підвищенню ефективності освітлювальних установок за рахунок значної економії енергії, яка досягає 75% порівняно з традиційними джерелами освітлення, такими як лампи розжарювання, ДРЛ, ДНАТ та інші. Світлодіодні освітлювальні установки мають перевагу у раціональному використанні енергії та відсутності інерційності при включенні та вимиканні, що є суттєвим фактором для освітлювальних систем [14,15]. Блок-схема освітлювальної установки з автономним живленням представлена на рис. 1.5. Залежно від конфігурації, освітлювальні установки будуть відрізнятися конкретними техніко-економічними показниками і, відповідно, мати різну

ефективність [14,15].

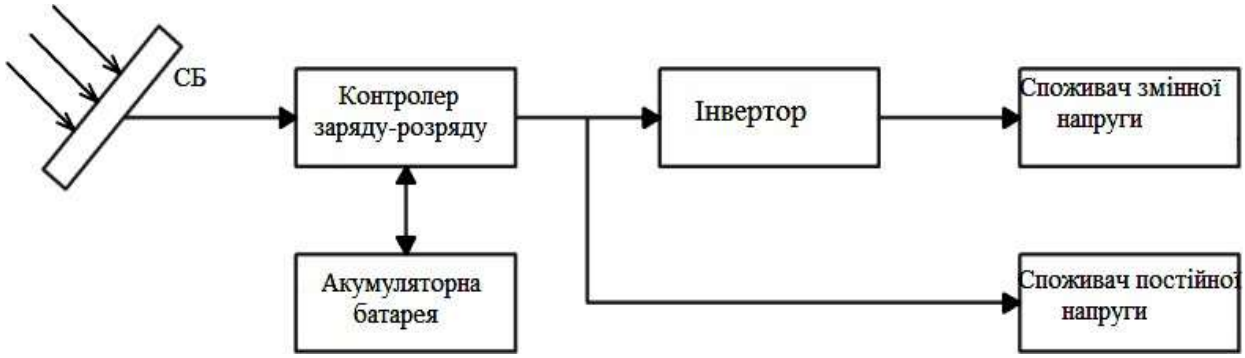


Рис. 1.5. Схема світильника з автономним живленням

Більшість сценаріїв застосування цього типу структури освітлювальних установок з автономним живленням пов'язана з низьким енергоспоживанням. Цей метод отримання енергії також може бути ефективним для умов експлуатації польового обладнання або для використання в будівельних процесах.

Встановлення сонячних панелей дозволяє перетворювати сонячне випромінювання на електроенергію, а в якості додаткового джерела енергії може використовуватися вітрогенератор [14].

Описана в [14] роботі гібридна вітро-сонячна система вуличного освітлення забезпечує приблизно 8 годин роботи світлової установки, яка представлена на рис. 1.6.

Для управління функціонуванням освітлювальної установки з автономним живленням, в роботі [16], використовується контролер заряду/розряду, акумулятор та керуючий блок, які розташовані в спеціальному боксі на опорі системи освітлення. Схема даної установки приведена на рис.1.7

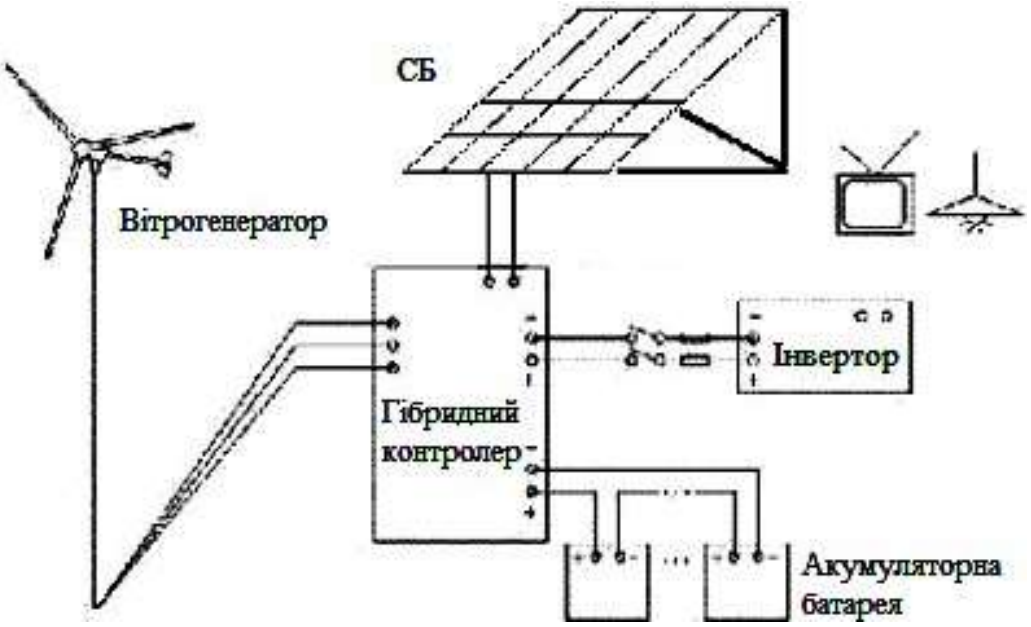


Рис. 1.6. Комбінована система вуличного освітлення [14]

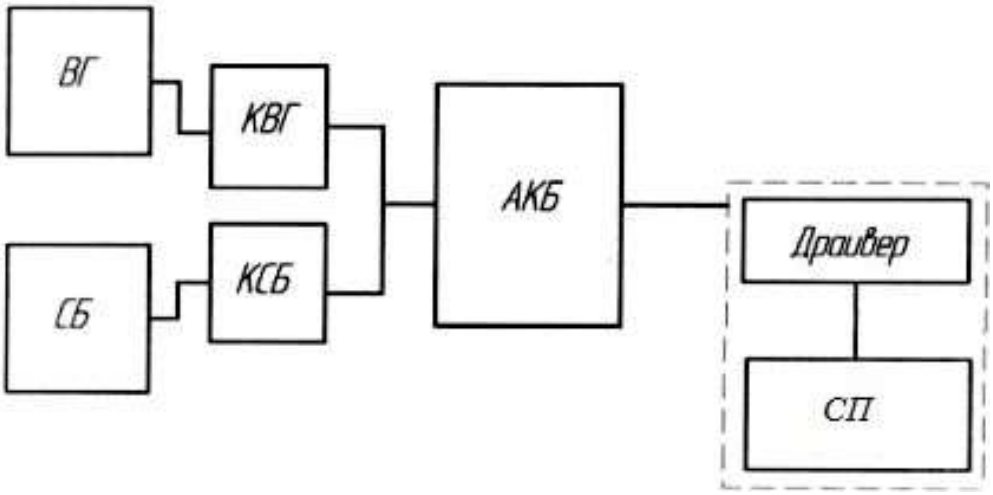


Рис. 1.7. Схема комбінованої системи вуличного освітлення з драйвером диммірування [17].

ВГ – вітрогенератор; КВГ – контролер вітрогенератора; КСБ – контролер сонячної батареї

Також у [17] роботі пропонується використання драйвера

світлодіодів (СП) для ефективного використання електроенергії, автоматично включаючи СП при настанні сутінків у черговому режимі. Коли людина або автомобіль з'являється у зоні виявлення на відстані 10-12 м або 100 м відповідно, СП переходить в активний режим (100% освітленість). При виході людини з області виявлення СП повертається до чергового режиму. Цей алгоритм дозволяє знизити споживання струму від акумуляторної батареї.

В залежності від типу сонячної панелі різняться і площі фотоелектричних перетворювачів різних типів, необхідних для вироблення 1000 Вт електроенергії [1,18-20].

Автори в [21-22] дослідженнях показали, що для більшості кристалічних та тонкоплівкових фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) потрібна значна площа для отримання однакової енергії через їхній невисокий ККД. Це обмежує їх застосування згідно з геометричними розмірами, включаючи вузли інформаційних мереж. Для промислового і локального використання найчастіше використовуються сонячні батареї (СБ) з полікристалічного або монокристалічного кремнію. Тонкоплівкові батареї краще адаптуються до розсіяного випромінювання та мають менші втрати потужності при затемненні окремих областей, функціонують краще при вищих робочих температурах, але за рахунок низького ККД поступають кристалічним ФЕП.

Згідно з [22-23] даними, сонячні ФЕП з аморфного кремнію рідше використовуються через низькі значення ККД та стабільності параметрів в часі. Однак тонкоплівкові ФЕП мають перевагу перед кристалічними - менша товщина в 10-100 разів, використання менше матеріалів, а також краща здатність до перетворення дифузного світла.

1.5. Накопичувачі для автономних освітлювальних установок

Електрична енергія, яку виробляють сонячні панелі протягом дня, використовується для заряджання акумулятора. Різні види акумуляторів розрізняються за такими параметрами, як кількість циклів перезарядки, термін зберігання, ємність, розміри, температурний діапазон роботи, час заряду та вартість.

В [26-27] роботах проведено аналіз акумуляторних батарей, які накопичують електроенергію від сонячних панелей протягом дня. У цих дослідах визначені вимоги до акумуляторних батарей (АКБ) для фотоелектричних перетворювачів:

- низький рівень саморозряду;
- здатність працювати в режимах глибокого розряду;
- робота з малими струмами заряду;
- ефективність при від'ємних температурах (для систем цілорічного використання);
- мінімальні вимоги до обслуговування.

АКБ, які можуть витримувати значну кількість циклів заряду/розряду, володіють такими характеристиками. Акумулятори стартерного типу, розроблені для автомобілів, не підходять для використання з фотоелектричними перетворювачами. Найширше поширення отримали свинцево-кислотні акумулятори, які виявилися найбільш вигідними за вартістю експлуатації. Вони мають відносно низьку вартість 1 кВт·год. енергії, порівняно з АКБ такої ж ємності, але вироблені іншими технологіями. Крім того, АКБ інших типів поступаються свинцево-кислотним акумуляторам за кліматичними характеристиками [26-27].

Свинцево-кислотні акумуляторні батареї (СКА), де електролітом є сірчана кислота, а електроди виготовлені з двоокису свинцю, найчастіше

отримують таку назву. На жаль, СКА мають більше недоліків, ніж переваг: вони громіздкі, мають низьку енергоємність, до 40 Вт·год/кг. Також вони відрізняються невеликою кількістю циклів розряду [26].

Автори [26,27] вивчають використання модернізованих свинцево-кислотних акумуляторів, де електроліт замінено на скловолокно. Це відрізняється можливістю повністю поглиблювати не лише весь електроліт, але й виділяти гази під час хімічних процесів.

Внаслідок цього акумулятор має структуру, яка нагадує листковий пиріг, з чергуванням пластин електродів і шарів електроліту. Вони щільно утримуються скловолокном та просочені бульбашками газу (кисню і водню), які активно взаємодіють у ході хімічних реакцій відновлення і окислення, зроблюючи їх більш інтенсивними. Цей процес відомий як рекомбінація, і в сучасних акумуляторах, виготовлених за AGM технологією, досягає 99%. Причина - електроліт не контактує з навколишнім середовищем і не змінює своєї хімічної природи, що підвищує безпеку акумулятора.

Основною перевагою акумуляторів, виготовлених за технологією AGM, є їхня здатність допускати багаторазові глибокі розряди. При цьому такі розряди майже не залишають слідів на акумуляторі. Це робить їх ідеальними для використання в автономних електричних системах.

Ще кращі властивості мають всі ті ж свинцево-кислотні акумулятори, до електроліту яких додали двоокис кремнію. Це призвело до заповнення простору між електродами своєрідним гелем, наповненим молекулами кисню і водню, які активно взаємодіють у процесах окислення і відновлення [28].

Хімічні процеси у таких акумуляторах майже повністю відтворюють процеси в батареях, виготовлених за технологією AGM, проте гелеві акумулятори ще ефективніше відновлюються зі стану глибокого розряду, мають велику довговічність і ємність. На жаль, їх вартість є трошки

вищою.

До недавнього часу найбільш поширеним методом зберігання електричної енергії було використання свинцево-кислотних акумуляторних батарей. Наприклад, їх широко використовують у системах безперебійного електропостачання малої потужності.

Автори [30] рекомендують використовувати літій-іонні (Li-ion) акумулятори, які відзначаються високою реактивністю та можливістю літію проникати в кристалічну решітку іншого матеріалу. Це дозволяє зберігати значну кількість енергії в атомних зв'язках, роблячи їх ідеальними для зберігання.

Завдяки наноструктурній топології, літій-іонні акумулятори мають низку беззаперечних переваг перед усіма існуючими аналогами за технічними характеристиками:

- Здатність приймати і віддавати значний струм заряду, дозволяючи накопичувати енергію в режимі онлайн. Розряд може бути троєкратно більший, ніж заряд, що свідчить про можливість миттєвої віддачі великої кількості енергії.
- Дуже низький рівень саморозряду, який не перевищує 2% від початкового заряду протягом місяця.
- Відсутність ефекту пам'яті, що означає відсутність необхідності повної розрядки перед кожним циклом заряду.

Основні параметри будь-якого акумулятора включають:

- Ємність: кількість енергії на 1 кг ваги.
- Струм розряду: швидкість, з якою акумулятор може віддати накопичену енергію.
- ККД: втрати енергії при заряді та розряді.
- Кількість циклів розряду та заряду.
- Період експлуатації.

Таблиця 1.5 Технічні характеристики накопичувачів [22-27]

Тип	Потужність, Вт/кг	Густина енергії Вт·год/кг	Ефективність, %	Роб. темп. °С	Кількість циклів
$LiFePO_4$	1400	80-120	99,9	- 45…80	<2000
Li-ion	1800	160	99,9	- 20…60	1200
Кислотно-свинцевий	180	30-40	70-92	-20…+60	500-800
Іоністори	>10000	<10	0,9-0,98	-40…+70	>1000000

Як видно з таблиці 1.5, літій-іонні акумулятори (Li-ion) мають значні переваги порівняно з свинцевими акумуляторами. Це визначається, в першу чергу, різним принципом дії. У свинцевих акумуляторах електроди реагують з електролітом - сірчаною кислотою, накопичуючи електроенергію. Проте з часом на поверхні електродів утворюється сульфат свинцю внаслідок взаємодії з кислотою, що призводить до непридатності акумулятора. Передчасне старіння свинцевих акумуляторів також спостерігається при розряді великими струмами та паралельному підключенні, яке часто використовується для збільшення загальної ємності.

У літій-іонних акумуляторах немає такої хімічної реакції, замість цього відбувається міграція іонів літію з електрода на електрод, накопичуючи чи віддаючи заряд. Такий принцип дозволяє Li-ion акумуляторам мати значно кращі характеристики.

З іншого боку, розвиток енергоємних технологій потребує розробки та удосконалення накопичувальних пристроїв, які можуть не лише зберігати велику кількість енергії, але й швидко віддавати її в навантаження [32-35] і витримувати велику кількість циклів заряду-

розряду без погіршення енергетичних характеристик. Зараз такі нелінійні ємнісні накопичувачі електроенергії, як суперконденсатори (СК) (відомі також як іоністори, ультраконденсатори та двошарові електрохімічні конденсатори) [40-44], привертають увагу завдяки їхнім характеристикам.

Сучасні суперконденсатори можуть витримувати понад мільйон зарядно-розрядних циклів без руйнування внутрішньої структури, що в 500 разів більше, ніж літій-іонні акумулятори [47]. Завдяки внутрішньому електричному опорові в 10-30 разів меншому, ніж у акумуляторах, суперконденсатори можуть подавати в навантаженні потужності і струми, які перевищують аналогічні характеристики акумуляторів в 10-30 разів [31-37]. Ємність батарей сучасних суперконденсаторів може досягати 10000 Ф, при номінальній напрузі 2,7-4 В [40]. Для використання суперконденсаторів на більших напругах їх можна з'єднувати послідовно і утворювати батареї суперконденсаторів на сотні вольт [38].

Порівняно з акумуляторами та звичайними лінійними конденсаторами СК мають значно вищі електродинамічні характеристики завдяки залежності їхньої ємності від напруги. Експериментальні вимірювання при заряді суперконденсаторів ємністю 470, 1500 і 2600 *Ф* від джерела постійної напруги, проведені в роботах [37-42], підтвердили, що під час заряду суперконденсатора його загальна ємність збільшується практично прямо пропорційно зростанню напруги на його клемах, а при розряді його ємність відповідно зменшується. Така залежність ємності суперконденсатора від напруги на його клемах пояснюється тим, що вона складається з послідовно з'єднаних багатьох ємностей, які зумовлені подвійним електричним шаром зарядів на поверхні пор активованого вугілля основних електродів СК. Тому із зростанням напруги збільшується діелектрична проникність електроліту та зменшується товщина подвійного електричного шару суперконденсатора, що призводить до майже лінійного збільшення його загальної ємності та нелінійного збільшення заряду.

У проведеному дослідженні [46] суперконденсатори заряджали від постійного джерела напруги, при цьому спостерігалось збільшення їхньої ємності разом із зростанням напруги на клемах. Враховуючи отриману залежність, загальну ємність суперконденсатора апроксимували як суму постійної ємності C1 = const та диференційної ємності Сд(U) = kU, де змінюється пропорційно зміні напруги U на клемах суперконденсатора.

Коефіцієнт пропорційності k = const, по суті, представляє собою часткову похідну ємності суперконденсатора від напруги U та виражається у Ф/В. Згідно із фізикою подвійного електричного шару, автори пропонують вираз [31-44] для визначення загальної ємності суперконденсаторів C(U):

$$C(U) = C_1 + kU.$$

У процесі моделювання режимів роботи суперконденсаторів, дослідники [31–44] використовують складні схеми заміщення. Для врахування розподілених електричних параметрів суперконденсаторів, запропоновано розгалужені електричні схеми заміщення з різною кількістю паралельних гілок, які включають концентровані лінійні та нелінійні елементи C, R і L [44]. Кількість гілок визначається необхідністю відтворити зарядні та розрядні перехідні процеси різної тривалості. Тільки в першій гілці (гілці швидкого розряду) введено лінійну і нелінійну ємність (відповідно C1=const та C1д =k1U) зі спільним внутрішнім активним опором R1, через який ці ємності C1 і C1д можуть заряджатись і розряджатись за одиниці-десятки секунд. Інші гілки також включають лінійні та нелінійні ємності, але їхні активні опори настільки великі, а перехідні процеси настільки тривалі, що нелінійні ємності не враховуються [37]. Друга гілка (гілка з затримкою) вважається зі сталими параметрами C2 і R2 і характеризує перехідні зарядні та розрядні процеси, завершуючи

їх в хвилинному діапазоні. Третя гілка (довготривала) також має незмінні параметри C2 і R2 та сталу часу, що перевищує 10 хвилин.

Більшість досліджень включає саме три гілки в електричні схеми заміщення СК. Іноді застосовують дві гілки [32], але це спрощення дозволяє аналізувати лише швидкі перехідні процеси, оскільки тривалість процесів понад 10 хвилин вносить значну похибку (30-60%).

Деякі вчені пропонують схему з 10 гілками [49], але її складність ускладнює швидкі енергетичні розрахунки. Для врахування процесів саморозряду суперконденсаторів у їхніх схемах заміщення вводять додатковий активний резистор Rср.

З урахуванням різних гілок з різними параметрами в електричних схемах заміщення суперконденсатора, можна припускати, що при швидкому заряді та розряді напруга на їх клемах швидко спадає на певний рівень, а потім повільно зменшується, але швидше, ніж за рахунок процесів саморозряду суперконденсаторів.

З більш тривалим зарядом суперконденсатора, процес зменшення напруги повинен відбуватись повільніше. Однак ці процеси ще не були повністю досліджені і вимагають подальших досліджень.

Висновки до розділу

1. Здійснено аналіз систем освітлення населених пунктів в різних регіонах України.

2. Проведено докладний огляд структури освітлювальних систем з автономним живленням для зовнішнього освітлення. Оцінено ефективність фотоелектричних панелей. Представлено акумулюючі пристрої та контролери заряду/розряду для різних типів акумуляторів.

3. Розглянуто різні моделі автономних фотоелектричних освітлювальних систем, які знаходяться на сучасному ринку, такі як Sun Shines, SUN-128, та EPS-soltec.

РОЗДІЛ 2

2. АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ОСВІТЛЮВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ

2.1. Дослідження робочих характеристик сонячних панелей

Для ефективного визначення оптимального режиму роботи фотоелектричного перетворювача (ФЕП), або сонячної батареї (СБ) в умовах зміни світлового потоку, температури та електричних параметрів навантаження, необхідно провести вимірювання та моделювання їх вольт-амперних характеристик (ВАХ).

Вимірювання ВАХ дозволяє розрахувати максимальну потужність та ККД СБ, а також здійснювати контроль дефектів на початковій стадії їх використання та прогнозувати деградацію сонячних елементів (СЕ). Основана на ВАХ можливість коригування навантаження спрямована на досягнення максимального відбору потужності.

Основні методи вимірювання ВАХ розподіляються на дві категорії [49]:

- статичні або безперервні методи (статичні вимірювання, вимірювання постійного струму);
- динамічні або імпульсні методи (динамічні вимірювання ВАХ, імпульсні вимірювання ВАХ).

В залежності від стану СЕ під час вимірювань ВАХ виділяють ізотермічні та ізодинамічні методи [49]. Ізотермічні методи передбачають вимірювання при стабільній температурі СЕ, сприяючи зменшенню теплових спотворень ВАХ та підвищенню точності результатів.

Ізодинамічні вимірювання проводяться так, щоб заряд, обумовлений ефектом захоплення носіїв на паразитних енергетичних рівнях напівпровідника, залишався сталим під час вимірювання ВАХ. Основна

мета ізодинамічних вимірювань - підвищення точності вимірювання ВАХ за рахунок уникнення або стабілізації ефекту захоплення носіїв [49].

Для проведення вимірювань вольт-амперних характеристик (ВАХ) використовувався статичний ізотермічний метод. Для цього використовувався лабораторний стенд, що включав імітатор сонячного випромінювання, вольтметр В7-16, амперметр Э 525 та магазин опорів.

У ролі імітаторів використовувалися газорозрядні лампи потужністю 100-1000 Вт. Спектральний склад випромінювання лампи з ксеноновим наповненням та спектр сонячного випромінювання представлені на рис. 2.1. З графіка видно, що ці спектри дуже схожі у видимій області.

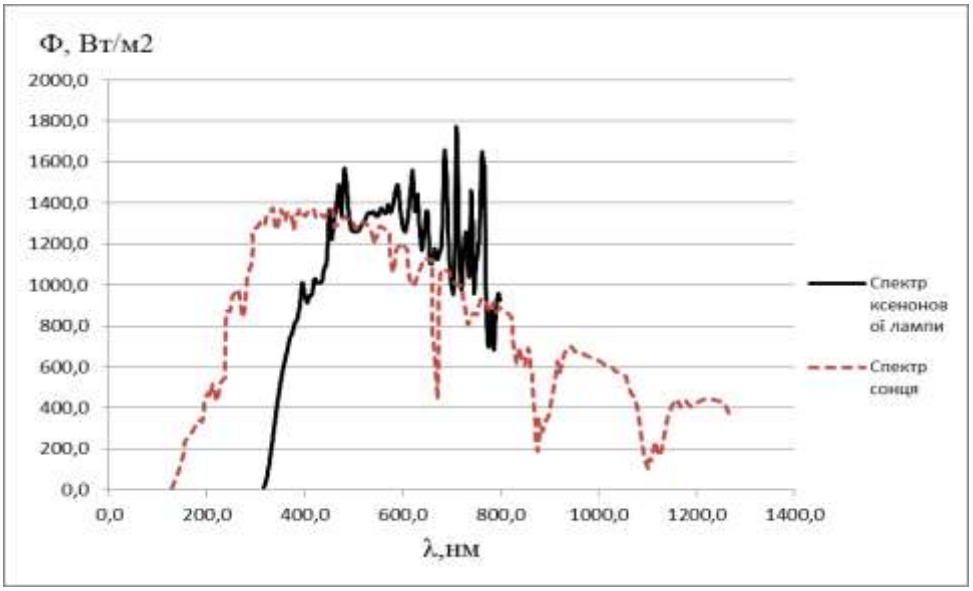


Рис. 2.1. Спектральний розподіл випромінювання сонця і ксенонової лампи

Були проведені вимірювання ВАХ сонячної батареї Altek 50Вт ALM-50M-36.

Світловий потік, що попадав на сонячну батарею (СБ), вимірювався за допомогою приладу DT-1307, похибка якого не перевищує 5%. Зміну густини світлового потоку досягали за допомогою регулювання відстані між світловим джерелом та сонячною батареєю, що забезпечувало діапазон

густини від 200 до 1000 Вт/м^2 [66]. Температура сонячної батареї підтримувалася на стабільному рівні приблизно 25 °С. Зміну струму та напруги на СБ регулювали шляхом зміни опору навантаження Rн, яким виступав магазин опорів МСР.

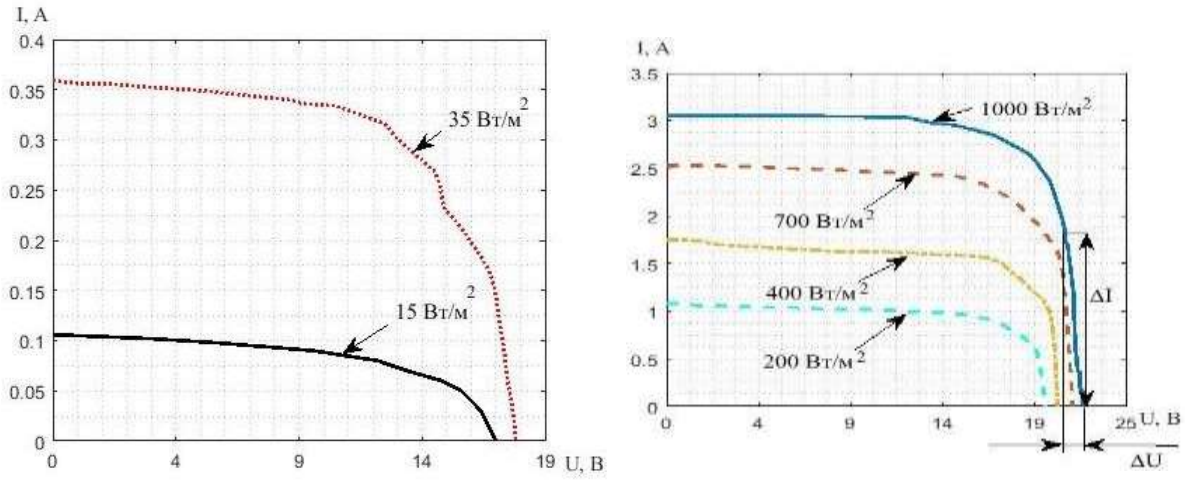
Для вивчення фотоелектричних параметрів сонячної батареї при низькому рівні опромінення (15–35 Вт/м2), яке часто спостерігається під час поганої погоди, використовувався світловий прилад FYGT300. Зображення цього стенду представлено на рис. 2.2. Світлові вольт-амперні характеристики (ВАХ) сонячної батареї АЛМ-50М-35 наведено на рис. 2.3, а графіки зміни споживаної потужності, виміряні при різних густинах потоку випромінювання, подано на рис. 2.4.



Рис. 2.2. Лабораторний стенд для вимірювання ВАХ

На світлових ВАХ при густині потоку випромінювання від 200 до 1000 Вт/м2 із зміною напруги від 0 до 15 В струм сонячної батареї (СБ) зазнає мінімальних змін. Значний спад фотоструму відбувається у діапазоні 19-22 В. За допомогою цього спаду було визначено величину послідовного опору Rп в еквівалентній схемі сонячної батареї (рис. 2.7). При густині потоку випромінювання до 50 Вт/м2 аналогічний різкий спад

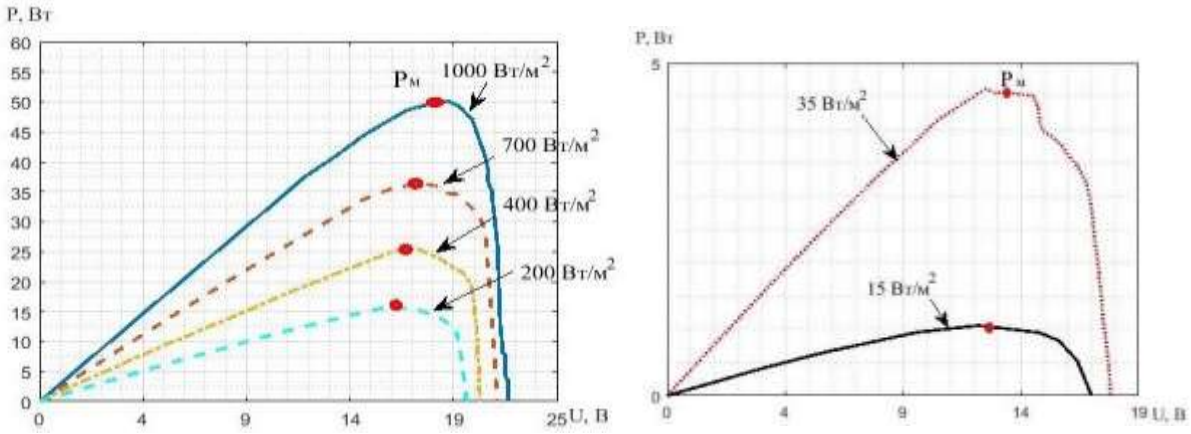
фотоструму спостерігається на ділянці з малим кутом нахилу до осі напруги до 12 В. При більш високій напрузі настає значний спад фотоструму.



а) б)

Рис. 2.3. ВАХ сонячної панелі АЛМ-50М при різній густині потоку опромінення *Вт/м²*:

а) 200-1000; б) до 50



а) б)

Рис. 2.4. Дослідження потужності сонячної панеліАЛМ-50М при різній густині потоку опромінення *Вт/м²*

З даних графіків були визначені $U_м$, $I_м$, при яких відбувається максимальне значення споживаної потужності, а також напругу холостого ходу $U_{х.х}$ і струм короткого замикання $I_{к.з}$. Ці параметри приведені в табл.

2.1.

Крім того, для сонячних панелей вводиться ще один параметр, який називається коефіцієнт заповнення і позначається *FF* і визначається з рівняння $FF=U_м \cdot I_м / U_{х.х} \cdot I_{к.з}$. Для даного типу батареї даний параметр лежить в межах 0,44-0,75, що є дещо заниженим для монокристалічних кремнієвих батарей.

Таблиця 2.1 Параметри сонячної батареї АЛМ-50М-35

Параметри	35 *Вт/м²*	15 *Вт/м²*	200 *Вт/м²*	400 *Вт/м²*	700 *Вт/м²*	1000 *Вт/м²*
FF	0,51	0,44	0,70	0,73	0,73	0,76
$I_м$, *А*	0,20	0,05	0,91	1,54	2,22	2,87
$P_м$, *Вт*	3,03	1,01	15,15	25,25	38,38	50,50
$R_п$, *Ом*	6,67	20,20	0,81	0,51	0,49	0,48
$U_м$, *В*	16,36	16,26	16,77	17,07	17,57	17,68
$U_{х.х}$, *В*	17,98	17,07	19,80	20,50	21,31	21,82
$I_{к.з}$, *А*	0,36	0,11	1,11	1,78	2,55	3,08

Вимірювання темнових ВАХ сонячної батареї (СБ) проводили в затемненій кімнаті. Для вимірювання струму, що проходить через СБ, використовували мікроамперметр, а джерелом живлення в даній установці було регульоване джерело напруги, що забезпечувало дискретні значення напруги з кроком 0,1 В. Вимірювання темнових ВАХ було проведено на сонячних елементах батареї АЛМ-50М-35.

На рис. 2.5 представлена обернена гілка темнової ВАХ сонячної батареї АЛМ-50М. З цієї характеристики був визначений шунтуючий опір Rш=8,3 кОм. На відрізку, що відходить від графіка на осі струму, визначили зворотний насичений струм I0=4 мкА. Ці параметри були використані при моделюванні СБ.

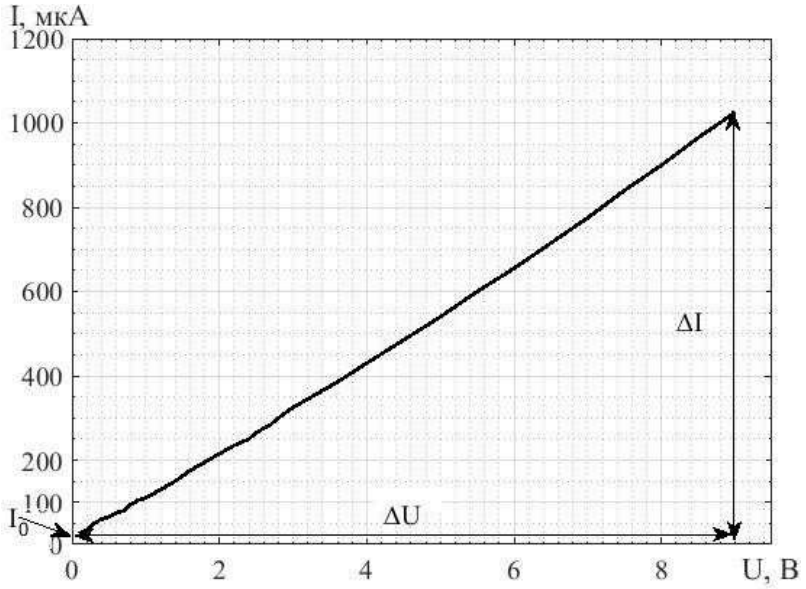


Рис. 2.5. ВАХ зворотної гілки сонячної панелі АЛМ-50М-35

2.2. Розробка моделі фотоелектричної панелі

Для створення моделі фотоелектричного перетворювача (ФЕП) була використана електрична схема, ключовими компонентами якої (рис. 2.6), є: джерело струму, діод, паралельний і послідовний опір. Джерело струму моделює процес виникнення фотоструму Іф внаслідок впливу освітлення. Діод знаходиться в паралельному з'єднанні з джерелом струму, і під впливом прямого зміщення пропускає певний струм Ід через наявність надлишкових концентрацій електронів в області n та надлишкової концентрації дірок в області p елемента. Шунтуючий опір фотоелемента Rш виникає через зворотний опір n-p переходу та різні провідні плівки чи забруднення на поверхні елемента, і він також підключений паралельно джерелу струму. Послідовний опір Rп - це опір напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлений фотоелемент. Еквівалентна схема сонячного елемента подана на рис. 2.6.

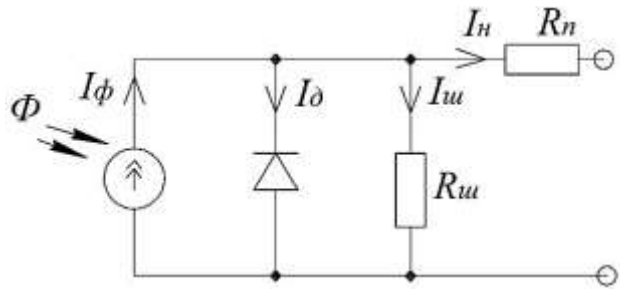


Рис. 2.7. Схема елемента сонячної панелі

Виходячи із того, що струм через діод описується рівнянням:

$$I_д = I_0\left(\exp\frac{eU}{AkT} - 1\right) \tag{2.1}$$

Згідно першого закону Кірхгофа та (2.1) струм ФЕП від навантаження визначається:

$$I_н = I_ф - I_0\left(\exp\frac{eU}{AkT} - 1\right) - \frac{U + I_н R_n}{R_ш}, \tag{2.2}$$

де U - напруга на затворі;

I_0 - струм насичення діода;

Іф - фотострум;

e - елементарний заряд;

A - коефіцієнт ідеальності діода ($1 \le A \le 2$);

k - стала Больцмана;

T - температура.

Формула (2.1) представляє собою найбільш точний інженерний метод розрахунку.

На підставі отриманих ВАХ були розраховані значення опорів Rш і Rn, які становлять відповідно 8,4 кОм та 0,5 Ом. Підставивши їх у формулу (2.2), отримали спрощене вираження:

$$I_н = I_ф - I_0\left(\exp\frac{eU}{AkT} - 1\right). \quad (2.3)$$

Також використовувалися значення Uxx та Ік.з, отримані за допомогою рівняння (2.3):

$$I_{к.з.} = I_ф, \quad (2.4)$$

$$U_{xx} = \frac{AkT}{e}\ln\left(\frac{I_{к.з.}}{I_0} + 1\right). \quad (2.5)$$

При використанні сонячних батарей як автономних джерел живлення для світлотехнічних систем та інших споживачів, виникає необхідність розрахунку умов передачі електроенергії до споживача.

Умовою максимальної передачі до навантаження є випадок, коли Rн = Rвн. За отриманими значеннями шунтуючого опору та опору діода було обчислено Rвн, що склало 7,8 кОм.

Коефіцієнт корисної дії (η), визначений як відношення корисної потужності, тобто потужності, що споживається навантаженням, до потужності батареї, дорівнює:

$$\eta = \frac{P}{P_{повн}} = \frac{R_н + R_л}{R_н + R_{вн} + R_л}. \quad (2.6)$$

Як видно із рівнянь (2.3 і 2.5), коефіцієнт ідеальності діода впливає на Uxx. Тому важливо враховувати його значення під час моделювання. Зменшення цього коефіцієнта ідеальності суттєво впливає на напругу сонячної батареї. Різні значення коефіцієнта ідеальності діода призводять

до відхилень напруги від паспортних значень, як показано на рис. 2.8.

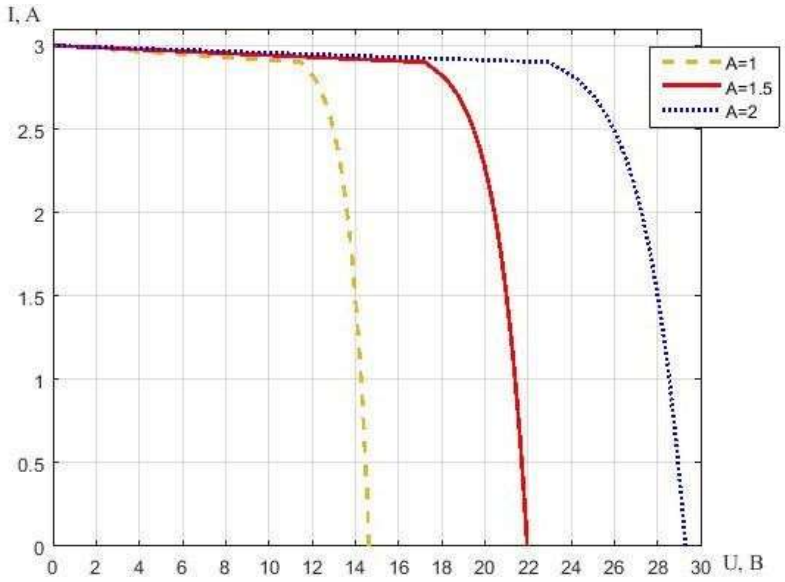


Рис. 2.8. Реальна ВАХ сонячної панелі.

Зміна зворотного струму насичення діода також істотно впливає на Uxx. Можливі випадки, коли в одній партії сонячних панелей струм насичення діода не узгоджується. Цей сценарій був відтворений у моделі і зображений на рис. 2.9.

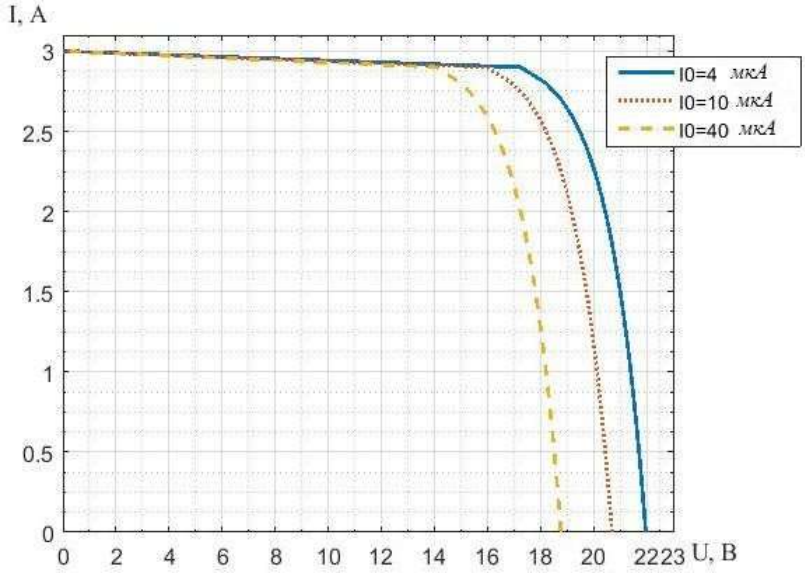


Рис. 2.9. ВАХ в залежності від струму насичення діоду

Підвищення значень струму насичення діода від I_0=3,9 мкА до I_0=41 мкА призвело до зменшення Uxx від 21,5 до 19,6 В, що в свою чергу знизило вихідну потужність.

2.3. Аналіз роботи блоку накопичення електроенергії

Для автономного живлення операційного підсилювача (ОП) за доби в умовах низької освітленості використання накопичувачів електричної енергії є необхідним. На сьогодніший час широко впроваджуються акумулятори Li-ion, які характеризуються широким температурним діапазоном та меншим саморозрядом, порівняно з кислотними та лужними акумуляторами. Одночасно з впровадженням Li-ion акумуляторів ведуться дослідження нових методів зберігання електроенергії, таких як суперконденсатори (СК) або іоністори.

Суперконденсатори позбавлені хімічних реакцій, а накопичення енергії відбувається за мільсекунди або хвилини в залежності від їхньої ємності. Вони здатні витримувати понад мільйон циклів заряду-розряду, не пошкоджуючи внутрішню структуру, що в 500 разів більше, ніж літій-іонні акумулятори. У дослідах щодо використання СК у блоках автономного живлення операційного підсилювача проводилося дослідження їхніх електрофізичних характеристик.

Експериментальні дослідження виконувалися методом циклування (заряд/розряд), що дозволяло уникнути впливу ефекту перерозподілу заряду на параметри ємності та утримувати температуру СК в межах похибки, яка не перевищувала 1°С. Це пояснюється тим, що під час заряду (розряду) на внутрішньому опорі СК виділяється тепло, для якого необхідний час.

На першому етапі суперконденсатор заряджався до потенціалу U. На

другому етапі СК утримувався при постійній напрузі, а на третьому етапі проводився розряд на постійний опір. Залежність напруги від часу на клемах суперконденсатора представлена на рис. 2.10, а залежність струму розряду СК показана на рис. 2.10.

На графіку рис. 2.10 можна виділити чотири ділянки: 1 – заряд СК; 2 – режим утримування СК під напругою; 3 – різке зниження напруги на клемах СК; 4 – плавний розряд СК. За спадом напруги на ділянці 4 визначали ємність СК за формулою:

$$C = -\frac{\Delta t}{R_н} \cdot \left(\ln \frac{U_2}{U_1} \right), \tag{2.7}$$

де Δt – тривалість розряду СК;

U_2/U_1 – відношення кінцевої напруги на клемах СК до початкової.

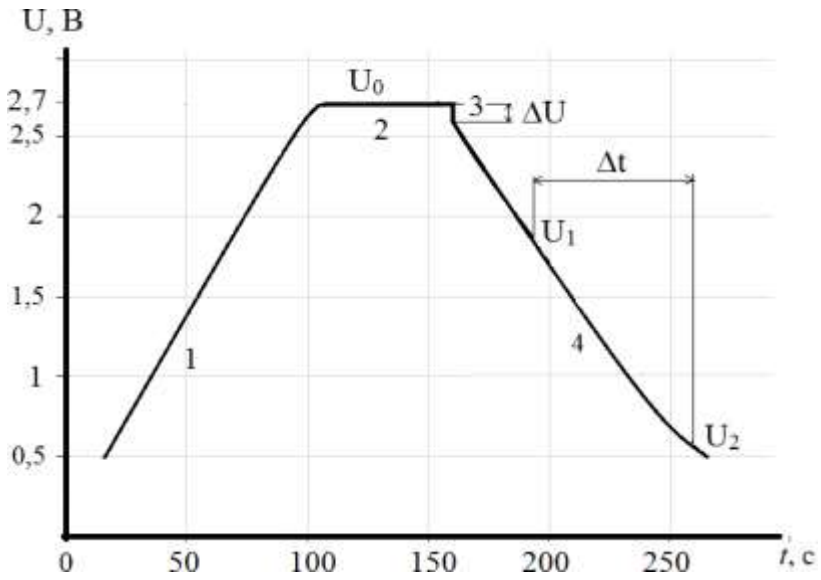


Рис. 2.10. Напруга на клемах при заряді суперконденсатора

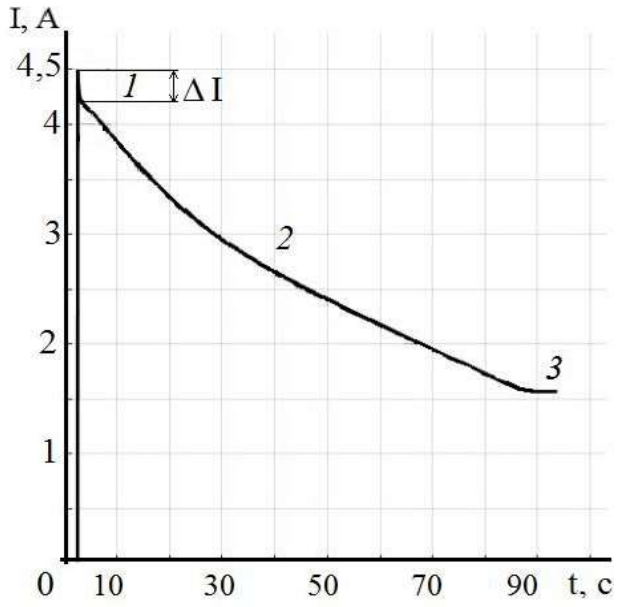


Рис. 2.11. Залежність розрядного струму від часу

Враховуючи, що індуктивність розрядного контура суперконденсатора (СК) є малозначною і фактично не впливає на швидкість наростання струму розряду, а комутатор К можна вважати ідеальним (з миттєвою комутацією, при якій статичні та динамічні втрати електроенергії відсутні), то при його замиканні струм розряду СК на опорі Rн майже миттєво зростає від нуля до 4,5 А. Після цього він поступово зменшується з різними константами часу.

На ділянці 1 (відображеної як швидкий розряд СК на рис. 2.11) спостерігається зниження струму приблизно на 0,3 А за 0,5 мс. Це може бути пояснено швидким використанням електроенергії поверхневого шару електродів СК. Більш повільний спад струму (приблизно за 84 с) на ділянці 2 пов'язаний із використанням енергії більш глибокого шару електродів СК. Тривалість процесів розряду СК на третій ділянці більше 300 с, як представлено на рис. 2.11. Обчислюючи відношення ΔU до ΔI на кожній з ділянок 1-3 на рис. 2.10 та рис. 2.13, була визначена зміна внутрішнього опору досліджуваного СК.

Для аналізу експериментальних результатів і розрахунку внутрішнього опору і ємності було створено програмне забезпечення в середовищі MATLAB.

Несмотря на значительні переваги суперконденсаторів, важливо враховувати, що в них, так само, як і в будь-яких конденсаторах електроенергії, виникає процес саморозряду, описуваний експоненційною залежністю $U = U_0 e^{-t/\tau}$.

Висновки до розділу

1. Розроблено методологію та використано лабораторну установку для вимірювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних панелей, визначення струму та напруги максимальної потужності споживача, а також зворотного струму насичення p-n переходу.

2. Запропоновано модель сонячного елемента, для якої експериментально визначено параметри, включаючи коефіцієнт корисної дії автономної системи живлення.

3. В ролі акумулюючої системи для автономного джерела живлення операційного підсилювача була запропонована батарея із суперконденсаторів.

4. Проведено моделювання впливу коефіцієнта ідеальності діода та зворотного струму насичення на напругу холостого ходу. Виявлено, що із збільшенням струмів насичення діода від I0=3,9 мкА до I0=41 мкА спостерігається зниження напруги холостого ходу від 21,5 до 19,6 В, що призводить до зменшення вихідної потужності.

РОЗДІЛ 3
3. ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1. Вимірювання потоку сонячного випромінювання

Дія сонячного потоку, що досягає земної поверхні, залежить від географічних координат місцевості та її кліматичних умов. Для аналізу енергетичного потенціалу сонячного випромінювання у вибраній локації була використана вимірювальна установка, описана блок-схемою на рис. 3.1. Ця установка дозволяє проводити вимірювання та запис густини потоку сонячного випромінювання в реальному часі з інтервалом 1 хвилина.

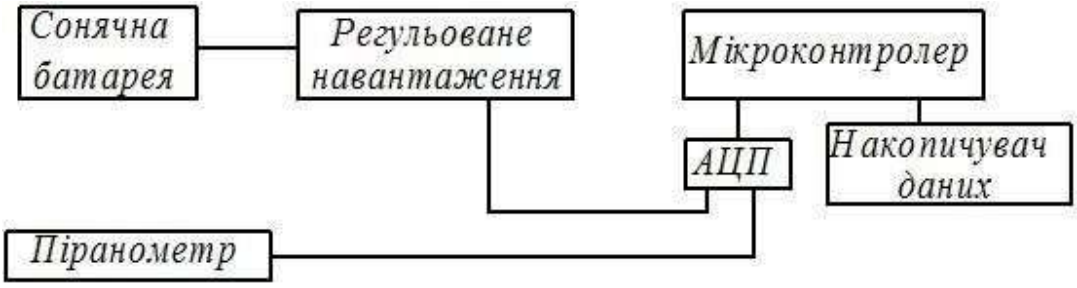


Рис. 3.1. Схема вимірювальної установки

У структурі даної установки використовуються наступні компоненти: мікроконтролер Atmega 32, який обладнаний 32 КБ Flash-пам'яті, 2 КБ SDRAM та 32 робочими регістрами для обробки та запису отриманих даних з 10-бітного аналогово-цифрового перетворювача; накопичувач даних Micro HHD; регульоване навантаження; сонячна батарея ALM-50M-35; та інфрачервоний безконтактний термометр.

Для фіксації часу реєстрації даних використовується мікросхема реального часу DS1307 з інтерфейсом I2C, яка має резервне джерело

живлення, що дозволяє записувати час отримання даних з аналогово-цифрового перетворювача. Ця функція корисна для подальшого аналізу даних і складання статистики їх зміни.

Інформація з аналого-цифрового перетворювача, яка вбудована в мікроконтролер, зберігається на карті пам'яті з файловою системою NTFS у форматі CSV з певним інтервалом, який може бути налаштований.

Електрична схема енергетичного блоку установки представлена на рис. 3.3. Напруга, отримана від сонячної батареї, подавалась на опір навантаження Rн, а також на подільник R1, R2 та Rш.

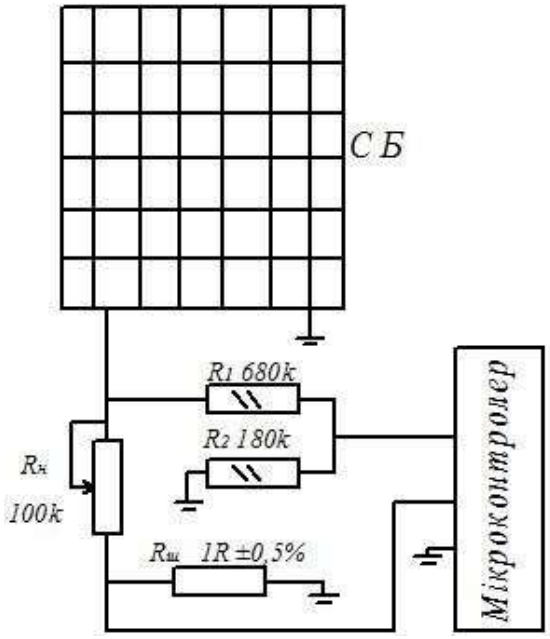


Рис.3.2. Електрична схема установки

За допомогою спаду напруги на Rш було визначено струм навантаження, при цьому похибка використаного шунта складала ±0,5%. Напругу на виході сонячної батареї (СБ) вимірювали, використовуючи подільник R1, R2, де використані високоомні опори для мінімізації їх впливу на результати вимірювань, і похибка цього подільника становила ±2%.

Потужність електричного струму, що генерується, визначали як добуток P=U·I, де опір навантаження був підібраний для роботи в режимі максимальної потужності СБ. Вихідна напруга каскаду в цьому режимі визначалася за формулою U = R · I, де R - опір резистора в ланцюзі зворотного зв’язку, а I - фотострум, що генерується фотодіодом.

З урахуванням підсилення другого каскаду В та регулювання в межах від 0 до 5 В чотирьох резисторів, що перемикаються в колі зворотнього зв’язку першого каскаду А, забезпечувало можливість вимірювання густини світлового потоку в різних діапазонах.

Для калібрування приладу використовувався вимірювач густини потоку сонячного випромінювання DT-1307 у Вт/м. Вимірювання проводилися при куті нахилу поверхні фотоприймача до горизонту a = 49°, що є оптимальним для широти Кропивницького. Усі експериментальні дані записувались на накопичувач та оброблялись в програмному середовищі Matlab.

3.2. Аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання з врахуванням кліматичних умов території

При вивченні енергетичного потенціалу сонячного випромінювання необхідно враховувати не лише географічні координати, але й кліматичні умови. Зараз доступні дані метеослужб для обласних та районних центрів на всій території України, включаючи температуру, хмарність, швидкість вітру, висоту хмар та атмосферний тиск у регіоні, але вони не включають інформацію щодо потоку сонячного випромінювання.

Для встановлення зв'язку між ступенем хмарності та енергією сонячного випромінювання були проведені експериментальні дослідження густини потоку сонячного випромінювання в м. Кропивницькому. На рисунках 3.3-3.4 подані дані щодо густини потоку сонячного

випромінювання та зміни потужності, що генерується сонячною батареєю, протягом травня 2020 року.

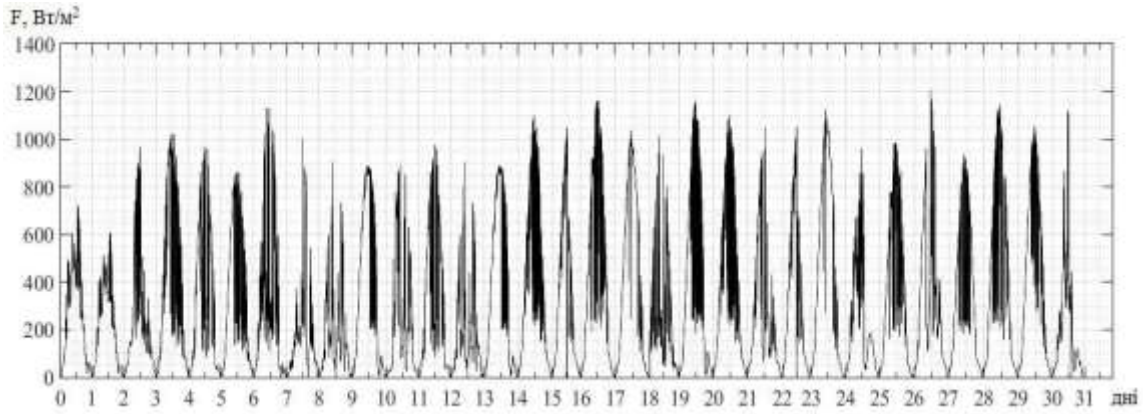


Рис. 3.3. Густина потоку сонячного випромінювання протягом травня 2020 р

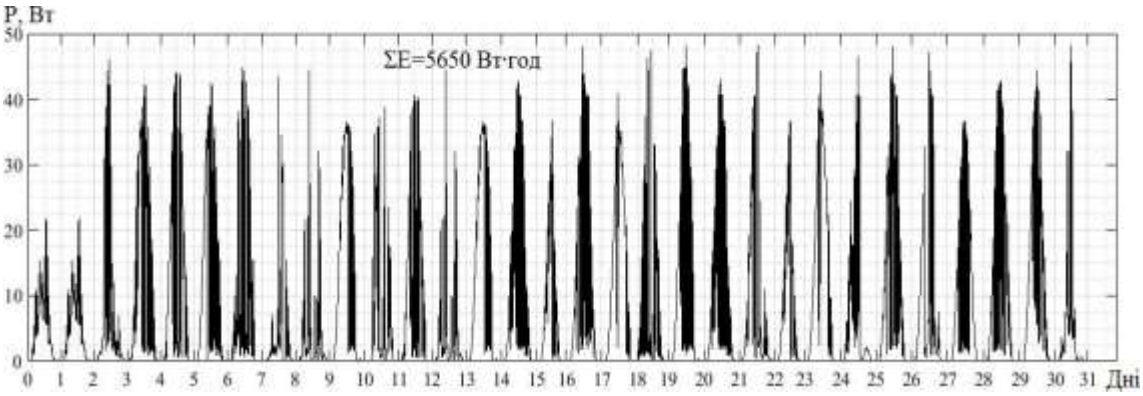


Рис. 3.4. Потужність сонячної панелі протягом травня 2020 р

З графіків змін потужності сонячної батареї було обчислено її вироблену енергію у Вт·год, що становила суму протягом кожного місяця у 2020-2021 роках: травень − 5660; червень − 6410; липень − 6760; серпень − 6630; вересень − 4710; жовтень − 2330; листопад − 1830; грудень − 1690; січень − 2050; лютий − 2890; березень − 3580; квітень − 4860.

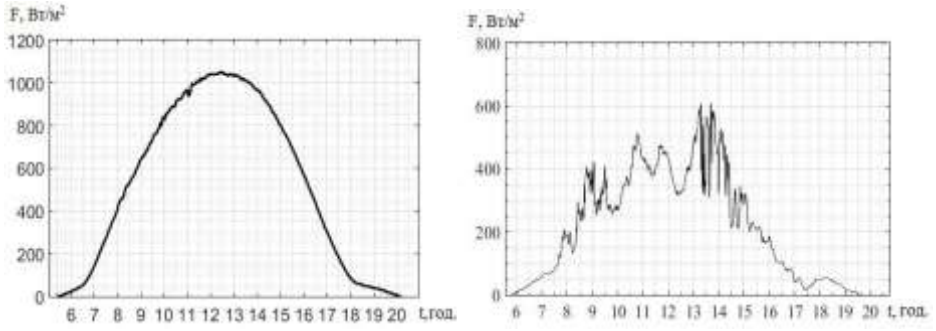
Вимірювання проводилися при постійному навантаженні Rн = 6,5 Ом, що відповідав максимуму потужності і дорівнював внутрішньому

опору сонячної батареї.

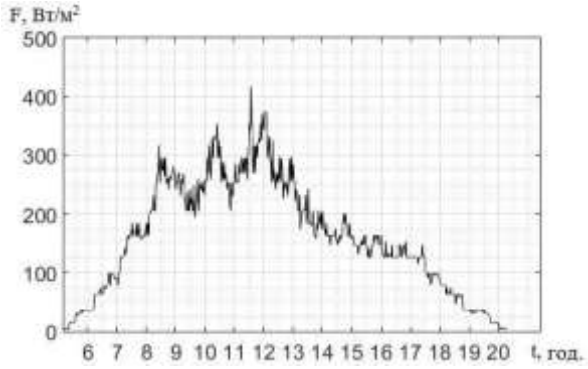
Як вже зазначалося, був вибраний часовий інтервал 1 хв., де зміна енергетичного потоку не перевищувала ±10 %. Для визначення енергії сонячного випромінювання протягом доби, статистична обробка результатів вимірювань включала визначення часового розподілу густини потоку випромінювання. Дискретні значення потоку були обмежені інтервалом 10 Вт/м^2. Обробку результатів виконано за допомогою програмного середовища Matlab і методу найменших квадратів для усереднення. Також проведено аналіз добового розподілу густини потоку сонячного випромінювання, що дозволило класифікувати дні місяця за величиною прозорості атмосфери.

На рисунках 3.5 подані графіки розподілу густини потоку випромінювання для сонячного, похмурого (з середньою хмарністю) та хмарного дня травня 2020 року.

З отриманих графіків було розраховано енергію сонячного випромінювання для сонячного дня (E=6,1 кВт·год/м2), похмурого дня (E=2,79 кВт·год/м2) та хмарного дня (E=1,55 кВт·год/м2), що попадає на площу 1 м^2, розташовану під кутом 49° до горизонту. Значення сумарної енергії сонячного випромінювання (E) за місяць та середньодобові значення енергії (Eсер) для кожного місяця протягом 2020-2022 років наведено в табл. 3.1.



а) б)



в)

Рис. 3.5. Густина сонячного випромінювання в травні 2020 року:

а) сонячного дня; б) похмурого дня; в) хмарного дня

Таблиця 3.1 Густина сонячного випромінювання за період 2020-2022 років

Місяць	2020 р.		2021 р.		2022 р.	
	Сумарна енергія E, $кВт \cdot год/м^2$	Середньодобова енергія $E_{сер}$,	Сумарна енергія E, $кВт \cdot год/м^2$	Середньодобова енергія $E_{сер}$,	Сумарна енергія E, $кВт \cdot год/м^2$	Середньодобова енергія $E_{сер}$,
Січень			53,14	1,73	56,10	1,84
Лютий			69,36	2,45	71,60	2,55
Березень			101,39	3,37	100,57	3,26
Квітень			112,40	3,77	116,28	3,88
Травень	137,39	4,39	133,62	4,28		
Червень	139,43	4,59	141,37	4,69		
Липень	146,88	4,69	149,74	4,79		
Серпень	144,13	4,59	145,35	4,69		
Вересень	102,71	3,37	107,30	3,57		
Жовтень	49,67	1,63	72,73	2,35		
Листопад	39,07	1,33	49,78	1,63		
Грудень	36,11	1,22	40,39	1,33		

З отриманих висновків було визначено кількість годин сонячного, похмурого та хмарного часу кожного місяця, а також середньодобову густину потоку сонячного випромінювання для сонячних Fc, похмурих Fп та хмарних Fx днів, і їх середні значення Fсер, які представлені в табл. 3.2. Аналогічні розрахунки були проведені для інших місяців.

Таблиця 3.2 Помісячний розподіл хмарності та густини потоку сонячного випромінювання за період 2020-2021 років

Місяць	Кількість хмарних годин	F_x, $Вт/м^2$	Кількість похмурих годин	F_n, $Вт/м^2$	Кількість сонячних годин	F_c, $Вт/м^2$
Травень	152,91	175,74	116,25	267,65	176,45	469,65
Червень	145,64	190,89	106,45	277,75	198,26	493,89
Липень	133,22	232,30	95,95	323,20	242,40	528,23
Серпень	131,30	156,55	90,90	272,70	247,45	494,90
Вересень	136,35	106,05	83,83	207,05	191,90	373,70
Жовтень	207,05	75,75	50,50	116,15	28,28	162,61
Листопад	193,92	64,64	54,54	143,42	16,16	154,53
Грудень	172,71	80,80	23,23	146,45	37,37	242,40
Січень	198,97	81,81	27,27	158,57	46,46	333,30
Лютий	186,85	127,26	46,46	198,97	59,59	373,70
Березень	170,69	146,45	75,75	219,17	132,31	406,02
Квітень	158,57	154,53	103,02	242,40	167,66	457,53

У період осінньо-зимових місяців на широті Кропивницького відзначається скороченням тривалості сонячного випромінювання з енергією понад 200 Вт/м². Розподіл густини енергетичного потоку сонячного випромінювання для жовтня 2020 року в межах 0-200 Вт/м² описується функцією $F=191e^{(-0,001t)}$. Аналогічні тенденції спостерігаються в листопаді, грудні та січні, де часовий розподіл визначається формулою $F=171e^{(-0,001t)}$.

При наближенні до весняного періоду на вказаній широті збільшується тривалість сонячного випромінювання з енергією понад 200 Вт/м². Для енергетичних потоків менше 200 Вт/м² часовий розподіл у лютому визначається залежністю $F=206e^{(-0,0041t)}$. Аналогічні закономірності спостерігаються у березні та квітні, де часовий розподіл описується функцією $F=276e^{(-0,001t)}$.

На основі середніх значень тривалості відповідного рівня хмарності за місяць були побудовані залежності Δt = f(N), які представлені в табл. 3.3. Обробку та аналіз проводили в програмному середовищі Microsoft Excel.

Таблиця 3.3 Поширеність тривалості атмосферного стану від величини ступеня хмарності за 2020-2021 роки

Місяць	$\Delta t = f(N)$
Травень	$\Delta t=7,423e^{0.45N}$
Червень	$\Delta t=8,9e^{0.4N}$
Липень	$\Delta t=10,91e^{0.4N}$
Серпень	$\Delta t=11,19e^{0.3N}$
Вересень	$\Delta t=7,8e^{0.35N}$
Жовтень	$\Delta t=7,2e^{0.4N}$
Листопад	$\Delta t=2,11e^{0.5N}$
Грудень	$\Delta t=1,46e^{0.55N}$
Січень	$\Delta t=1,24e^{0.6N}$
Лютий	$\Delta t=1,87e^{0.5N}$
Березень	$\Delta t=2,82e^{0.45N}$
Квітень	$\Delta t=5,14e^{0.45N}$

Враховуючи зміну тривалості сонячного випромінювання протягом доби та зміну кута нахилу сонця до горизонту протягом року, були проведені порівняльні аналізи між потоком сонячної енергії та

кліматичними умовами місцевості, зокрема хмарністю, для кожного місяця у 2020-2021 роках. Результати отриманих залежностей між середньодобовою сонячною енергією та середньодобовим рівнем хмарності Есер=f(N) представлені в табл. 3.4. Тут Есер - густина енергії сонячного випромінювання (кВт·год/м2) на поверхні, розташованій під кутом 49° до горизонту протягом одного дня, а N - середній рівень хмарності протягом цього періоду.

Таблиця 3.4 Залежності середньодобової сонячної енергії від середньодобової хмарності

Місяць	$E_{сер}=f(N)$
Травень	$E_{сер} = -0{,}5567 \cdot N + 6{,}2789$
Червень	$E_{сер} = -0{,}5675 \cdot N + 7{,}0202$
Липень	$E_{сер} = -0{,}7724 \cdot N + 7{,}8964$
Серпень	$E_{сер} = -0{,}687 \cdot N + 7{,}1902$
Вересень	$E_{сер} = -0{,}6172 \cdot N + 5{,}9776$
Жовтень	$E_{сер} = -0{,}4836 \cdot N + 4{,}577$
Листопад	$E_{сер} = -0{,}41 \cdot N + 4{,}205$
Грудень	$E_{сер} = -0{,}33 \cdot N + 3{,}273$
Січень	$E_{сер} = -0{,}396 \cdot N + 4{,}0485$
Лютий	$E_{сер} = -0{,}3971 \cdot N + 4{,}7681$
Березень	$E_{сер} = -0{,}5195 \cdot N + 5{,}824$
Квітень	$E_{сер} = -0{,}5434 \cdot N + 6{,}465$

Використовуючи отримані залежності та дані від метеослужби, була проведена оцінка середньомісячної енергії сонячного випромінювання за період 2012-2021 років. Графік помісячної динаміки густини потоку сонячної енергії за цей період наведено на рис. 3.6. Також, базуючись на

усереднених помісячних даних протягом шести років (2020-2022), був побудований графік зміни середньомісячного рівня густини потоку сонячної енергії протягом року, який представлений на рис. 3.7.

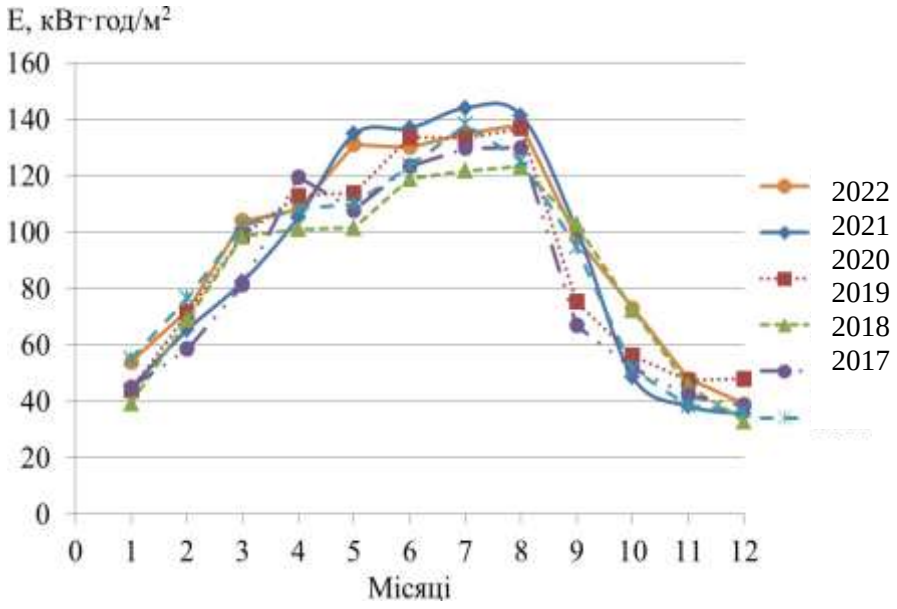


Рис. 3.6. Зміна густини енергії сонячного випромінювання для кожного місяця за 2017 - 2022 рік

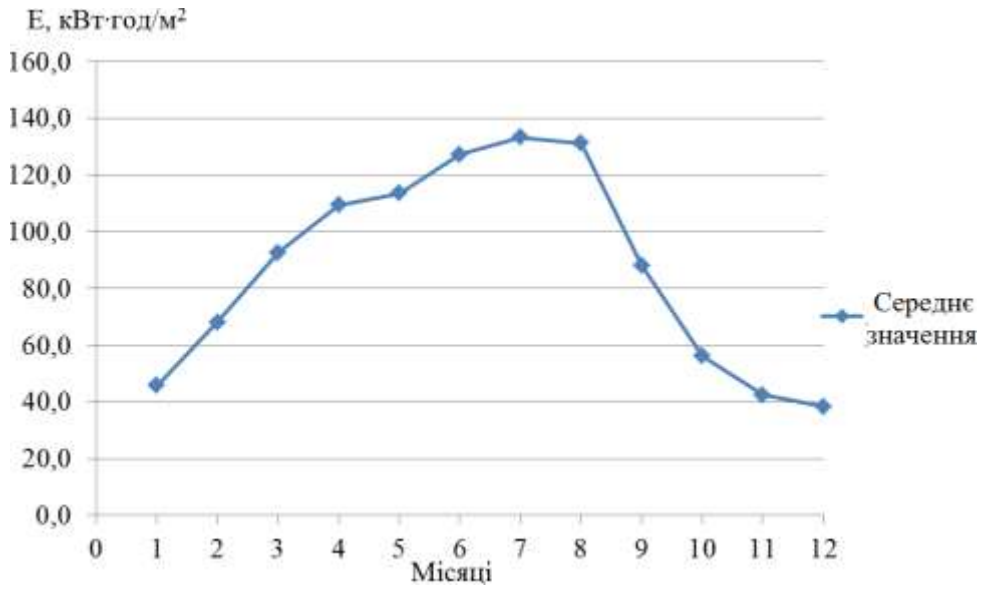


Рис. 3.7. Середньомісячні значення густини енергії сонячного випромінювання протягом року

На рисунку 3.8 наведено графік щомісячних змін сонячної енергії протягом 2022 року. Також на цьому графіку подано щомісячні дані щодо електроенергії, використовуваної на зовнішнє освітлення в місті Кропивницький.

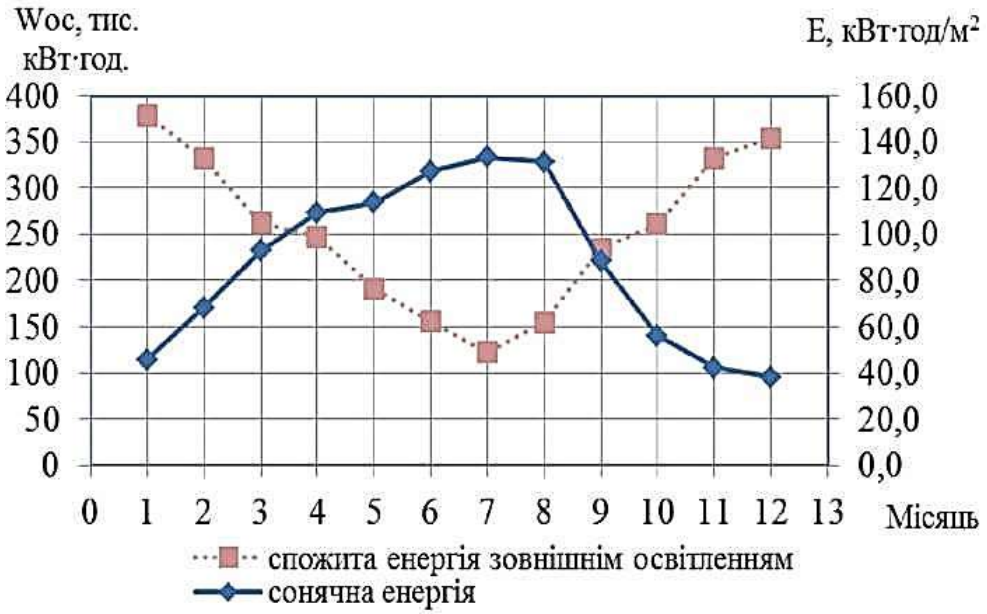


Рис. 3.8. Сонячна енергія та спожита енергії в системі зовнішнього освітленням м. Кропивницького.

Висновки до розділу:

1. Розроблено методологію та сконструйовано експериментальний зразок для вимірювання та реєстрації інтенсивності сонячного випромінювання, що надало можливість аналізувати часовий розподіл поверхневої інтенсивності сонячного випромінювання для міста Кропивницький та визначити щомісячну інтенсивність сонячної енергії протягом періоду з 2020 по 2022 роки.

2. Проведено оцінку впливу тривалості хмарності протягом кожного місяця у період з 2020 по 2022 роки на величину сонячного випромінювання.

3. Встановлено аналітичний зв'язок між середньодобовою поверхневою інтенсивністю сонячного випромінювання та середньодобовим ступенем хмарності Есер=f(N). Це дозволило здійснити розрахунок середньомісячної та середньорічної інтенсивності сонячної енергії для міста Кропивницький протягом 2017-2022 років, що коливається від 996 до 1141 кВт-год/м², і середнє значення за цей період складає 1068 кВт-год/м². Відхилення протягом останніх шести років від середнього значення не перевищує 9%.

РОЗДІЛ 4.
4. МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОЇ ОСВІТЛЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

4.1. Розрахунок сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення

У цьому дослідженні автоматична система вмикання та вимикання сонячного освітлення активується при досягненні певного рівня освітлення, що регулюється напругою на сонячному блоці. Додатковий захист від неналежної активації під час інтенсивної хмарності реалізований у вигляді таймера, змінюваного в межах від 0 до 9 годин. Крім того, система ефективно керує зарядом і розрядом акумулятора, як показано на блок-схемі енергетичної установки (рис. 4.1), яка включає сонячний модуль, блок літій-іонних акумуляторів або суперконденсаторів, систему керування та світловий прилад.

З метою раціонального використання енергії з акумулятора використовується датчик руху, спільно з пристроєм для регулювання світлового потоку світлодіода на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). У умовах зменшеної освітленості світлодіод вмикається в режимі чергового освітлення (25-60% яскравості), а при виявленні людини в радіусі 10 метрів система переходить в активний режим.

Після відсутності руху у зоні виявлення система автоматично повертається до чергового режиму. Такий алгоритм функціонування освітлення дозволяє в середньому зменшити споживання енергії від акумулятора на 50%. До системи керування також входять інвертор для перетворення постійної напруги в змінну та блок балансування напруги на окремому елементі акумулятора.

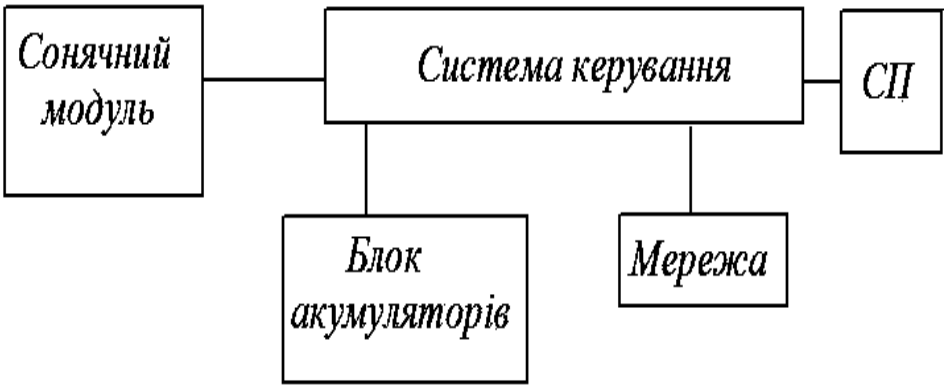


Рис. 4.1. Схема сонячної установки для зовнішнього освітлення

Вихідними параметрами розрахунку є середньодобове споживання електроенергії для зовнішнього освітлення населеного пункту протягом кожного місяця.

Генеровану середньодобову електроенергію однією сонячною батареєю $E_{СБ}$ розраховували за формулою:

$$E_{СБ} = \mu \cdot E_{сер} \cdot S_0,$$

де μ - визначає коефіцієнт корисної дії сонячної батареї; Есер - представляє собою середньодобове значення енергії сонячного випромінювання; S_0 вказує на робочу площу поверхні одного сонячного елемента в квадратних метрах.

Формула для визначення кількості сонячних панелей (N) та їх поверхні (S) використовує відношення між спожитою енергією на освітлення (Wосв) та генерованою енергією однією сонячною батареєю (ЕСБ). У цих розрахунках використовуються такі параметри:

$$N = W_{осв} / E_{СБ}.$$

$$S = N \cdot 1{,}66,\ м^2.$$

Для визначення характеристик накопичувальної системи, призначеної для роботи зовнішнього освітлення протягом 9-12 годин, розглядали використання Li-ion акумуляторів або суперконденсаторів. Ці акумулятори характеризуються широким діапазоном робочих температур та низьким рівнем саморозряду порівняно з іншими типами акумуляторів. У наших розрахунках взяли Li-ion акумуляторну батарею з ємністю С = 1100 А·год та номінальною напругою 48 В.

Необхідну ємність акумуляторної батареї $C_б$ визначали за допомогою формули:

$$C_б = W_{осв}/(U_б \cdot k),$$

де $U_б$ – номінальна напруга акумуляторної батареї;

k – коефіцієнт використання ємності (для акумуляторів Li-ion $k = 0{,}8$, а суперконденсаторів $k = 1$).

Визначимо число акумуляторних батарей:

$$n = C_б/(C \cdot \mu_б),$$

Шляхом комбінування сонячних панелей у послідовно-паралельні з'єднання можна регулювати як вихідну напругу, так і струм, надаючи можливість оптимального налаштування режиму роботи всієї сонячної енергетичної установки. Прикладом такого з'єднання є послідовне з'єднання 24 сонячних батарей, яке подальше об'єднання в два паралельно з'єднані масиви дозволяє досягти номінальної напруги 732 В, напруги холостого ходу 893 В і струму короткого замикання 16,4 А. Ефективне

управління такою системою реалізується через гібридний інвертор, який враховує оптимальні умови для підключення двох масивів сонячних панелей та забезпечує максимальну продуктивність сонячної енергетичної установки.

Результати розрахунків для енергетичної установки зовнішнього освітлення в населених пунктах України наведено в табл. 4.1, в якій врахована генерована електроенергія за рік однією сонячною батареєю KV 250M.

Таблиця 4.1 Параметри сонячної установки зовнішнього освітлення

Область	$E_{СБ,}$ *кВт·год*	$N_{СБ}$, шт.	$W_{АКБ}$, *тис. кВт·год* ($U_{АКБ}$=48 *В)*	$n_{АКБ}$, шт.	Ціна *СБ тис.грн*	Ціна *АКБ тис.грн.*
Вінницька	325,45	63554,8	22454,9	226818	502087	2154776
Волинська	312,80	32239,1	10951,5	110617	254692	1050869
Дніпропетровська	350,75	142807	54512,3	550627	1128179	5230953
Донецька	349,60	105668	40095,9	405007	834787	3847563
Житомирська	317,40	29764,3	10279,9	103834	235139	986423
Закарпатська	308,20	57117,1	19141,8	193354	451224	1836867
Запорізька	359,95	78541,6	30694,7	310046	620479	2945433
Івано-Франківська	307,05	42701,8	14262,3	144065	337343	1368623
Київська	324,30	164506	57935,9	585207	1299597	5559473
Кіровоградська	345,00	38972,4	14610,8	147584	307883	1402046
Луганська	349,60	15467,5	5869,6	59284	122192	563190
Львівська	304,75	176961	58702,9	592962	1397989	5633137
Миколаївська	371,45	64831,3	26146,4	264108	512169	2509025
Одеська	371,45	1627939	65654,7	663179	1286062	6300193
Полтавська	339,25	49055,6	18112,5	182955	387543	1738069
Рівненська	315,10	61060,4	20879,4	210907	482374	2003616
Сумська	330,05	68567,6	24615,8	248643	541687	2362103

Продовження таблиці 4.1

Область	$E_{СБ,}$ *кВт·год*	$N_{СБ}$, шт.	$W_{АКБ}$, *тис. кВт·год* ($U_{АКБ}$=48 *В)*	$n_{АКБ}$, шт.	Ціна *СБ тис.грн*	Ціна *АКБ тис.грн.*
Тернопільська	312,80	28605,1	9716,4	98147	225978	932398
Харківська	340,40	186509	69074,8	697725	1473420	6628385
Херсонська	371,45	30439,4	12276,3	124002	240471	1178024
Хмельницька	319,70	67891,4	23601,5	238396	536338	2264767
Черкаська	338,10	69059,8	25419,6	256766	545573	2439278
Чернівецька	316,25	33359,2	11482,8	115990	263535	1101908
Чернігівська	307,05	27473,5	9175,9	92688	217038	880539
м.Київ	324,30	249177	87755,4	886414	1968500	8420941

Розрахунки базуються на даних NASA про густину потоку сонячного випромінювання в Україні та використанні Li-ion акумуляторів ємністю 100 А·год.

Також табл. 4.1 включає розрахунки енергетичної потужності WАКБ для автономного живлення зовнішнього освітлення, де використовуються акумуляторні батареї з напругою UАКБ=48 В.

Розрахунки також включають в себе вартість сонячних батарей та акумуляторів, призначених для даної системи. Ціни складають 17500 грн за сонячну батарею та 39500 грн за акумуляторну батарею.

4.2. Техніко-економічний розрахунок сонячної установки для зовнішнього освітлення

Техніко-економічний розрахунок було проведено для м. Кропивницького, який наведено у табл. 4.2. Для комплектації першого типу електростанції буде потрібно 779 *млн. грн.,* а для другого типу – 328

млн. грн. В даних розрахунках не враховані затрати на монтаж, релейний захист, трансформаторні підстанції та подальшу експлуатацію кожної із енергетичних систем.

Таблиця 4.3. Техніко-економічний розрахунок сонячної електростанції для зовнішнього освітлення м. Кропивницького

Назва обладнання	Тип сонячної електростанції	Ціна за шт. *тис. грн.*	Кількість шт.	Ціна *тис.грн.*
Сонячна батарея KVazar KV 200M	I - тип	7,9	67646	534403,4
	II - тип		24908	196773,2
Інвертор Watt 10000 HY	I - тип	110	706	77660
	II - тип		260	28600
Li-ion акумулятори LP 48100	I - тип	9,5	6918	65721
	II - тип		6918	65721
Монтажні комплектуючі для установки сонячних панелей на землю	I - тип	180	564	101520
	II - тип		208	37440
Всього:	I - тип			779304
	II - тип			328534

Для встановлення зв’язку між спожитою електроенергією та зовнішнім освітленням побудована графічна залежність:

$$W = 53842e^{0,146\,N},$$

Побудований за даною графічною залежністю графік залежності споживання енергії системою зовнішнього освітлення *W*, від кількості світлоточок *N* дає можливість виконати оцінку запропонованого заходу.

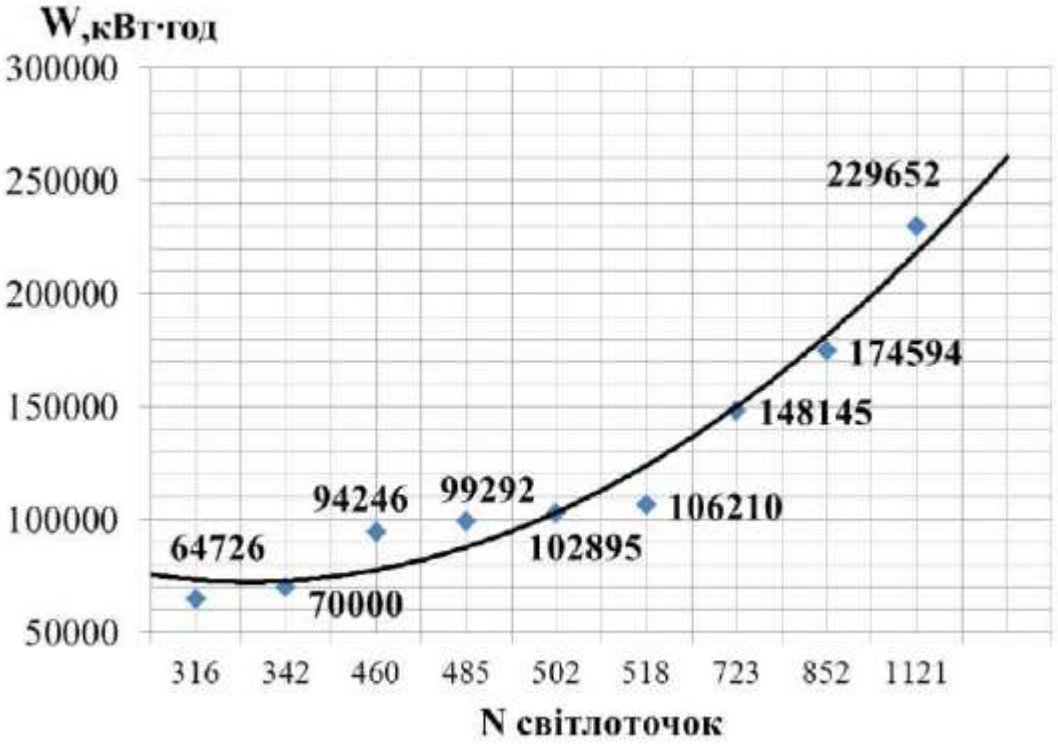


Рис. 4.2. Залежність енергії, спожитої зовнішнім освітленням W, від кількості світлоточок N

Висновки до розділу

1. Представлена методика розрахунку сонячних енергетичних систем для освітлення населених пунктів, яка включає два варіанти використання. Перший варіант повністю забезпечує електроенергією зовнішнє освітлення протягом осінньо-зимового періоду, в той час як другий варіант розрахований на автономне живлення весняно-літніх місяців.

2. Представлено детальний аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання по регіонах України та проведено оцінку споживаної енергії для зовнішнього освітлення для м Кропивницького. Результатом є вивчення залежностей між кількістю світильників та споживаною енергією для різних населених пунктів даного регіону.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Запропонована модель сонячного елемента була досліджена експериментально для СБ типу ALM-50M. Параметри цієї моделі були визначені, а також проведено моделювання впливу коефіцієнта ідеальності діода і зворотнього струму насичення діода на Uxx. Виявлено, що збільшення струмів насичення діода від I0=4 мкА до I0=40 мкА призводить до зменшення Uxx від 21,6 до 19 В і, відповідно, до зниження вихідної потужності.

2. В ролі акумулюючої системи для автономного джерела живлення запропоновано батарею із суперконденсаторів. Вивчено лінійну залежність ємності СК від напруги зарядки. Показано, що збільшення тривалості витримки суперконденсаторів при номінальній напрузі 2,7 В від 5 хв. до 360 хв. призводить до збільшення часу їх саморозряду від 0,3·104 до 2,4·104 с.

3. Розроблено методику та здійснено вимірювання густини потоку сонячного випромінювання в режимі реального часу на широті м. Кропивницького. Розраховано часовий розподіл густини енергетичного потоку сонячного випромінювання і визначено кількість енергії сонячного випромінювання протягом кожного місяця у період з 2020 по 2022 роки.

4. Проведено аналіз впливу кліматичних умов протягом кожного місяця в період з 2020 по 2022 роки на густину потоку сонячного випромінювання. Виявлено аналітичну залежність середньодобової енергії сонячного випромінювання від ступеня хмарності E(N) у кожному місяці.

5. На основі виявлених аналітичних залежностей визначено енергетичний потенціал сонячного випромінювання західного регіону України протягом періоду з 2020 по 2022 роки. Встановлено, що середньорічна густина потоку сонячної енергії становить 1045,9 кВт·год/м2, а відхилення не перевищують 5 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стан сфери зовнішнього освітлення в Україні за 2017 рік [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://minregion.gov.ua.

2. Burke A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles / A. Burke // Proc. of the IEEE. - 2007.- V. 95. - No. 4. - P. 806-820.

3. Burke A., Miller M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications / A. Burke, M. Miller

4. Інтегрований вуличний світильник Shenzhen [Електронний ресурс]. Режим доступа: http://www.shinehui.com/en/products_list.php?prid1=21.

5. Уличные світильники SunShmes [Електронний ресурс]. - Режим доступа: http://sun-shines.ru/product/street-light.

6. Фотоэлектрические установки EPS-Soltec [Електронний ресурс].

- Режим доступа: http://www.eps-soltec.com/en/produkte/strasen-wege-undplatzbeleuchtung.

7. Чумакевич В.О. Обґрунтування можливості освітлення парків в місцях постійної дислокації за допомогою сонячних панелей у львівській області /

А. О. Чумакевич, В. В. Атаманюк, І. В. Пулеко, А. М. Дубовський // Військово- технічний збірник. - 2015. - № 13. - С. 102-105.

8. Пастушенко М.С. Перспективи впровадження відновлювальних джерел електричної енергії на залізничному транспорті України // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. - 2013. - № 12. - С. 45 - 51.

9. Кожем'яко В.П. Аналітичний огляд сучасних технологій

фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В.П. Кожем'яко, В.Г. Домбровський, В.Ф. Жердецький, В.І. Маліновський, Г.В. Притуляк // Оптико- електронні інформаційно-енергетичні технології. - Т. 22. - №. 2. - С. 141-157.

10. Литвиненко А.С. Автономна система освітлення гібридного типу /А.С. Литвиненко, О.М. Діденко, Ю.О. Васильєва, Л.Д. Гуракова, К.І. Іоффе // Светотехника и электроэнергетика. - 2016. - №1. - С. 12-18.

11. Григораш, О.В. Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О.В. Григораш, Ю.И. Стрелков // Промышленная энергетика, №4. - 2001. - С. 37-40.

12. Евстафьев В.А., Майкова О.В Автономный светодиодный уличный фонарь // XIX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии». - 2013. - С.41-42.

13. Назаренко Л.А. Солнечные энергетические установки с голограммными концентраторами энергии / Л.А. Назаренко, А.С. Литвиненко // Светотехника и электроэнергетика. - 2010. - № 3-4. - pp. 21 25.

14. Michael Forst. Germany’s module industry poised for growth // SUN & Wind Energy. -Vol.5. -2011. - pp.256-263.

15. Данилов И.А. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие. // - К.:ВШ, 2005.

16. Ермолова Н.С., Моураов А.Г. Возобновляемые источники энергии: новые технологии использования солнечной энергии // Наука вчера, сегодня, завтра: сб. ст. по матер. XVI-XVII междунар. науч.-практ. конф. - 2014. - № 9- 10(16).

17. Владимир Гуревич Свинцово-кислотные аккумуляторы: устройство, принцип действия, применение // Силовая электроника. - 2012. - № 5.

18. Шембель О.М., Білогуров В.А. Основні характеристики

сучасних хімічних джерел струму різних електрохімічних систем / О.М. Шембель, В.А. Білогуров // Сучасна спеціальна техніка. Науково-практичний журнал. - 2009. - № 2(17). - С. 66-86.

19. Гаврилко П.П. Розвиток та впровадження сонячної енергетики в домогосподарствах україни / П.П. Гаврилко, Р.С. Чорний, Я.В. Шевчук // Міжнародний науковий журнал. - 2016. - Том 2. - №10. - С. 66-71.

20. Nema S. K., Nema R. K., Agnihorti G. A.: Int. J. Energy and Environment. - 2010. - No. 1. - P. 487.

21. Білецький О.О., Супруновська Н.І., Щерба А.А. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їхніх початкових і кінцевих напруг / О.О. Білецький, Н.І. Супруновська, А.А. Щерба // Техн. Електродинаміка. - 2016. - № 1. - С. 3-10.

22. Изотов В.Ю., Громадский Д.Г., Малетин Ю.А. Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатори / В.Ю. Изотов, Д.Г. Громадский, Ю.А. Малетин // Наук. вісті НТУУ "КПГ. - 2008. - № 6. - С. 114-118.

23. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами / Н.И. Супруновская, А.А. Щерба // Техн.електродинаміка. - 2015. - № 4. - С. 3- 11.

24. Супруновская Н.И., Щерба А.А., Иващенко Д.С., Белецкий О.А. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторів / Н.И. Супруновская, А.А. Щерба, Д.С. Иващенко, О.А. Белецкий // Техн.електродинаміка. - 2015. - № 5. - С. 3-11.

25. Щерба А.А., Супруновська Н.І. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений. / А.А. Щерба, Н.І. Супруновська // Техн. електродинаміка. - 2012 - № 5. - С. 3-9.

26. Burke A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles / A. Burke // Proc. of the IEEE. - 2007.- V. 95. - No. 4. - P. 806-820.

27. Burke A., Miller M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications / A. Burke, M. Miller //Journ.of the Power Sources Issue. 1, January 2011. - Vol. 196. - P. 514-522.

28. Burke A., Miller M., Zhao H. Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density / A. Burke, M. Miller, H. Zhao // Research Report. - UCD-ITS-RR-12-06. - Institute of Transportation Studies. University of California. - May 2012.

29. Burke A., Zhao H. Application of sepercapacitors in electric and hybrid vehicles / A. Burke, H. Zhao // Research Report. - UCD-ITS-RR-15-09. - Institute of Transportation Studies. University of Califotnia. - 2015.

30. Green-Cap (ELECTRIC DOUBLE LAYER CAPACITORS). - Available online at: http://www.masters.com.pl/files/ds/samwha/ samwha-green- cap.pdf.

31. Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrskyy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zaharchenko S.M., Portier R. Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids / O.M. Ivanova, M.I. Danylenko, G.E. Monastyrskyy, V.I. Kolomytsev, Y.M. Koval, A.A. Shcherba, S.M. Zaharchenko, R. Portier. // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. - 2009. - T.31. - No 5. - Pp. 603-614.

32. Kurzweil P., Frenzel B. Capacitance characterization metods and ageing be haviour of supercapacitors / P. Kurzweil, B. Frenzel. // Proc. the 15th International seminar on double layer capacitors. - Deerfield Beach, Fl., U.S.A., December 5-7 2005.

33. Maletin Y. New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles / N. Stryzhakova, S. Zelinskyi, S. Chernukhin, D. Tretyakov, H. Mosqueda, N. Davydenko, and D. Drobnyi. // Journ. of Energy and Power Engineering. - 2015. - No. 9. - P. 585-591.

34. MihailescuB., Svasta P.,Varzaru G. Hybrid Supercapacitor - Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications /B. Mihailescu, P. Svasta, G. Varzaru. // U.P.B. Scientific Bulletin, Series C.- 2013. - Vol. 75. - Iss. 2. - P. 277-290.

35. Rafik F. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling / F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, and A. Berthon. // Journal of Power Sources. - 2007. - Vol. 165. - No. 2. - P. 928-934.

36. Roedem B. Thin - film PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs / B. Roedem // Refocus.- 2006. -Vol. 7. -No 4.-Pp. 34-39.

37. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications / L. Zubieta, R. Bonert // IEEE Trans. On Industry Applications. - January-February 2000. - Vol. 36. - No. 1. - P. 199-205.

38. Філюк Я.О. Світлотехнічні установки з автономним живленням // V Міжнародна науково-технічна конференція „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи “, 23-27 лютого 2015 року. - Т. : ТНТУ, 2015. - С. 115-116.

ДОДАТКИ

Додаток А

ОХОРОНА ПРАЦІ

Освітлення території підприємств, допоміжних приміщень і окремих робочих місць повинно відповідати нормативним вимогам.

Робоче освітлення повинно забезпечувати освітленість на робочих поверхнях не нижче нормативної.

Аварійне освітлення повинно забезпечувати на робочих поверхнях освітленість не менше ніж 5 % від нормативної. За системи загального освітлення рівень аварійного освітлення повинен бути не менше ніж 2 лк всередині приміщень.

Евакуаційне освітлення повинно забезпечувати освітленість на підлозі основних проходів, на землі та на східцях сходів не менше ніж 0,5 лк.

Кріплення світильників робочого та аварійного освітлення повинно бути надійним, а розташовані вони повинні бути так, щоб забезпечити безпеку та зручність їх обслуговування. Обслуговування світильників з переносних драбин, з вантажопідіймальних кранів, зі спеціальних пересувних вишок повинно бути безпечним.

Обслуговування світильників освітлення будівель з вантажопідіймальних кранів необхідно здійснювати не менше ніж двома працівниками за нарядом- допуском з дотриманням вимог техніки безпеки.

Проектною документацією та інструкціями, що затверджені роботодавцем, повинні бути передбачені заходи з обслуговування світильників для постійного забезпечення необхідної освітленості робочих місць.

Під час зміни технологічного процесу, заміни або перестановки устаткування на окремій дільниці цеху освітленість цієї дільниці необхідно привести у відповідність з чинними нормативно-правовими актами.

У процесі експлуатації освітлювальних установок необхідно періодично проводити такі види обслуговування:

не менше ніж один раз на рік перевіряти рівень освітленості в контрольних точках і рівень загальної освітленості приміщень;

- перевіряти наявність у світильниках скла, ґрат, сіток, справність світильників спеціального виконання тощо в строки, визначені особою, відповідальною за електрогосподарство;
- виконувати очищування ламп і освітлювальної арматури для приміщень з інтенсивним пиловиділенням - 4 рази на місяць, для приміщень з незначним виділенням пилу, кіптяви - 2 рази на місяць;
- не менше ніж один раз у квартал перевіряти справність аварійного та евакуаційного освітлення.

Під час засклення ліхтарів будівель віконним склом необхідно під засклення встановлювати горизонтальні металеві сітки шириною не менше ніж 0,7 м при вертикальному склінні, а при нахиленому та горизонтальному ширина сіток повинна визначатися розрахунком з величини горизонтальної проекції засклених рам.

Світильники, що розташовані на висоті не більше ніж 4,5 м над рівнем підлоги, обслуговують з переносних драбин. Не дозволяється розташовувати світильники над устаткуванням і стрічками конвеєрів. У випадку, коли обслуговування світильників з драбин ускладнено, необхідно облаштовувати спеціальні майданчики. Для обслуговування світильників, розташованих над кранами або кран-балками, на підприємствах, що будуються та реконструюються, необхідно передбачати спеціальні майданчики, що не повинні перешкоджати обслуговуванню та ремонту кранів.

Для запобігання затіненню робочих місць кранами повинно бути передбачено додаткове підкранове освітлення світильниками, що підвішені до нижніх частин ферм кранів.

На висоті монтажу світильників більше 5 м їх обслуговування необхідно проводити з пересувних вишок, колисок та інших пристосувань.

Пересувні вишки повинні бути обладнані майданчиками з перилами, виконаними відповідно до вимог пункту 9.2 розділу VII цих Правил. Для доступу на майданчики повинні бути передбачені сходи (скоби).

Вмикання та вимикання рубильників загального освітлення в будівлях цехів, зміна та очищення світильників, арматури та ламп, зміна штепсельних розеток і запобіжників, монтаж проводів може проводити тільки електротехнічний персонал.

Для переносного електричного освітлення необхідно застосовувати світильники напругою не вище ніж 42 В. Під час роботи всередині металевих ємностей, печей, котлів, колодязів, млинів напруга в освітлювальній мережі повинна бути не вище ніж 12 В. У місцях, де в повітрі є або можуть бути вибухонебезпечні гази, пари та пил, для переносного освітлення необхідно застосовувати світильники у вибухозахищеному виконанні напругою не вище ніж 12 В.

Захаращувати світлові прорізи приміщень матеріалами, виробами, інструментом та іншими предметами не дозволяється.

На підприємствах повинні бути розроблені та затверджені роботодавцем інструкції з охорони праці щодо розміщення світильників для забезпечення необхідної освітленості робочих місць.

Основні причини нещасних випадків від дії електричного струму:

- випадковий дотик, наближення на небезпечну відстань до струмопровідних частин, що перебувають під напругою;
- поява напруги дотику на металевих конструктивних частинах електроустаткування (корпусах, кожухах тощо) у результаті пошкодження ізоляції або з інших причин;
- поява напруги на відключених струмопровідних частинах, на яких працюють люди, унаслідок помилкового включення установки;

- виникнення напруги кроку на поверхні землі через замикання проводу на землю.

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом є:

- забезпечення недоступності струмопровідних частин, що перебувають під напругою, для випадкового дотику;
- електричний поділ мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням, захисним відключенням; - застосування малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмопровідних частин застосуванням кожухів, огорож, подвійної ізоляції;
- захист від небезпеки при переході з вищої на нижчу напругу;

-контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;

- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів - переносних приладів і запобіжних пристроїв;
- організація безпечної експлуатації електроустановок.

Одним із заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках є захисне заземлення.

Захисне заземлення – навмисне електричне з’єднання з землею чи її еквівалентом металічних неструмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок замкнення на корпус і по іншим причинам (індуктивний вплив сусідніх струмоведучих частин, виніс потенціалу, розряд блискавки і т. п.).Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки враження струмом у випадку доторкання до корпусу

електроустановки та до інших неструмоведучих металічних частин, що опинилися під напругою в наслідок замкнення на корпус та по іншим причинам. Захисне заземлення потрібно відрізняти від робочого заземлення та заземлення блискавкозахисту.

Заземлення блискавкозахисту – навмисне з'єднання із землею блискавкоприймачів і розрядників з метою відводу від них струмів блискавки в землю.

Принцип дії захисного заземлення – зниження до безпечних значень напруги доторкання і кроку, обумовлених замкненням на корпус та іншими причинами. Це досягається шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання (зменшенням опору заземлювача), а також шляхом вирівнювання потенціалів основи, на якій стоїть людина, і заземленого обладнання (підйом потенціалу основи, на якій стоїть людина, до значення, близького до значення потенціалу заземленого обладнання).

Захисне заземлення є найбільш простою і в той же час дуже ефективною мірою захисту від ураження електричним струмом при виникненні напруги на металевих неструмоведучих частинах. Перед початком роботи в електроустановках оперативним персоналом даної електроустановки повинні бути виконані технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

1. Вимкнення обладнання, що виводиться в ремонт та використання заходів проти його помилкового включення або самоувімкнення.

2. Установка тимчасових огорож, плакатів: "Не вмикати, працюють люди", "Не відкривати, працюють люди".

3. Приєднання переносного заземлення до заземлюючої шини і перевірка відсутності напруги на струмопровідних частинах, які з метою безпеки виробництва робіт потрібно заземлювати.

4. Накладання переносного заземлення на вимкнені

струмопровідні частини електроустановок одразу після перевірки, відсутності напруги або включення заземлюючих ножів, що мають бути на кожному приєднані електроустановки.

5. Огородження робочого місця і вивішування плакатів, що дозволяють працювати “Працювати тут”.

Керівник підприємства зобов’язаний забезпечити утримання, експлуатацію і обслуговування електроустановок відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Для цього він повинен:

- призначити відповідального за справний стан і безпечну експлуатацію електрогосподарства з числа інженерно-технічних працівників, які мають електротехнічну підготовку і пройшли перевірку знань у встановленому порядку;
- забезпечити достатню кількість електротехнічних працівників;
- затвердити Положення про енергетичну службу підприємства, а також посадові інструкції і інструкції з охорони праці;
- встановити такий порядок, щоб працівники, на яких покладено обов’язки з обслуговування електроустановок, вели ретельні спостереження за дорученим їм обладнанням і мережами – оглядом, перевіркою дії, випробуванням і вимірюванням;
- забезпечити перевірку знань працівників у встановлені строки згідно з вимогами ПТЕЕС;
- забезпечити проведення проти аварійних, приймально- здавальних і профілактичних випробувань та вимірювань електроустановок згідно з правилами і нормами (ПТЕЕС);
- забезпечити проведення технічного огляду електроустановок.

Фахівці служб охорони праці зобов’язані контролювати безпечну експлуатацію електроустановок і повинні мати групу IV з електробезпеки. Забороняється покладати на енергослужбу обов’язки, що не входять до її професійної компетенції. Оперативне обслуговування може здійснюватися як місцевими оперативними чи оперативно-ремонтними працівниками, за якими закріплена ця електроустановка, так і виїзними, за якими закріплена група електроустановок. Вид оперативного обслуговування, кількість оперативних працівників в зміну чи на електроустановці визначаються особою,

відповідальною за електрогосподарство, за узгодженням з керівником підприємства (організації) і зазначається в місцевих інструкціях. До оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають оперативні схеми, посадові і експлуатаційні інструкції, інструкції з охорони праці, особливості обладнання і пройшли навчання, дублювання та перевірку ПТЕЕС.